



**Universidade de
Aveiro
2009**

Departamento de Engenharia Mecânica

**Rui Tiago Teixeira
Monteiro**

**Análise de Ciclo de Vida do Biodiesel – Aplicação à
Realidade Nacional**



**Rui Tiago Teixeira
Monteiro**

**Análise de Ciclo de Vida do Biodiesel – Aplicação à
Realidade Nacional**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica da Dr. Margarida Isabel Cabrita Marques Coelho, Professora Auxiliar Convidada e do Dr. Fernando José Neto da Silva, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Professor Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo
Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

orientadora

Professora Doutora Margarida Isabel Cabrita Marques Coelho
Professora Auxiliar Convidada do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

co-orientador

Professor Doutor Fernando José Neto da Silva
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

arguente

Doutora Maria Fernanda Cardoso Rosa
Investigadora Principal do Departamento de Energias Renováveis do INETI

agradecimentos

Esta página do trabalho será dedicada a agradecimentos a todas as pessoas que ao longo dos anos me ajudaram na minha formação não só académica como também pessoal.

Gostaria, em primeiro lugar de agradecer à Professora Doutora Margarida Coelho e ao Professor Doutor Fernando Neto, por todo o apoio e orientação prestados ao longo da realização deste trabalho de Dissertação de Mestrado. A disponibilidade e compreensão demonstrada por ambos foi, a todos os níveis, excepcional e por isso lhes estou grato.

Gostaria igualmente de agradecer a todos os professores que tive ao longo dos anos que passei no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro. Todos eles tiveram um papel fundamental na minha formação tanto através dos conhecimentos transmitidos como pelos seus exemplos de seriedade, profissionalismo e empenho.

Gostaria também de agradecer a todos os amigos que tive ao longo dos anos, por todo o apoio e amizade demonstrados tanto nos bons como nos maus momentos.

Por último, gostaria de agradecer à minha família e namorada, todo o amor, carinho e apoio, sem eles jamais estaria no lugar onde me encontro hoje.

palavras-chave

Portugal, transportes, combustíveis, biodiesel, consumo energético, emissões, ciclo de vida.

resumo

Devido às preocupações cada vez maiores da sociedade em relação às alterações climáticas e degradação do meio ambiente existe uma busca por meios que permitam reduzir os impactos negativos na nossa intervenção na Terra. Nesse âmbito, os meios de transporte têm um peso muito elevado no que respeita a emissões poluentes e consumos energéticos. A preocupação com a elevada dependência do sector dos transportes em relação a combustíveis fósseis e à sua queima com todas as implicações que lhes estão associadas torna urgente a busca de combustíveis alternativos mais limpos. Os biocombustíveis podem ser uma possível resposta para esse problema.

Através de Análises de Ciclo de Vida (ACV) é possível identificar e quantificar os impactos que a produção e utilização dos biocombustíveis terá no meio ambiente. O principal objectivo deste trabalho de investigação centrou-se na actualização do modelo de ACV GREET (desenvolvido pelo Argonne National Laboratory) de forma a este se adaptar à realidade Europeia e, concretamente, à Portuguesa. Uma vez concluída essa fase foi possível efectuar uma ACV para o biodiesel em Portugal. Foi seleccionado um caso de estudo, baseado na aplicação de biodiesel na frota de autocarros urbanos da cidade de Braga.

Através do estudo efectuado foi possível a verificação que ao longo de todo o seu ciclo de vida (poço às rodas) o biodiesel tem a si associado um consumo total de energia de cerca de 17.820kJ/km. Contrapondo o valor obtido para o caso do gasóleo com o consumo total associado ao ciclo de vida do gasóleo de 16.292kJ/km verifica-se um aumento de 9,5%. Este aumento de consumo energético deve-se não apenas a um aumento de consumo de combustível (devido ao menor PCI do biodiesel) mas também ao maior consumo verificado durante as fases de produção de biodiesel (cerca de 6% superior).

Relativamente a emissões gasosas totais do ciclo de vida, foi possível verificar que com a utilização de biodiesel obtêm-se reduções significativas na maioria dos gases poluentes e causadores de efeito de estufa considerados no estudo. Nas emissões de CO₂ verifica-se uma redução de 15% em relação ao gasóleo, no caso de CO e NO_x verificam-se reduções de 17%, para os VOC a redução é de 16%, nas emissões de partículas e CH₄ as reduções são de 22% enquanto que no caso de SO_x a redução é de 52%. A única excepção à tendência verificada ocorre no caso nas emissões de N₂O onde se registou um aumento total de 0,5% em relação às emissões verificadas para o gasóleo.

keywords

Portugal, transports, fuels, biodiesel, energy consumption, emissions, life cycle.

abstract

Due to increasing concerns of human society in matters related to climate change and environmental degradation there is a need to reduce the negative impacts of our intervention on Earth. In this context, the transports sector has a big influence in greenhouse gases emissions and energy consumption. Concerns with the high dependence of the transport sector on fossil fuels with all the implications associated with them makes the seek of cleaner alternative fuels even more urgent. Biofuels can be a vital answer to this problem.

Through Life Cycle Assessment (LCA) it is possible to identify and quantify the impacts that production and use of biofuels will have on the environment. The main objective of this research work was to update the GREET model (developed by the Argonne National Laboratory), in order to perform an adaptation to the Portuguese reality. Following this step, a LCA for biodiesel in Portugal was carried out. A case study was selected, considering the use of biodiesel in the urban buses fleet of the city of Braga, in the north of Portugal.

Through the study it was possible to verify that in the biodiesel's life-cycle (well to wheels) there is an increase of 9,5% in the total energy consumption (for biodiesel it is about 17.820kJ/km, contrasting with the case of diesel, in which the total consumption is 16.292kJ/km). This increase in energy consumption is due not only to the increase of fuel use (due to biodiesel's lower PCI) but also to higher consumption during production of biodiesel (about 6% higher). It is possible to conclude that the use of biodiesel generates significant reductions for most of the pollutants and greenhouse gases considered in the study. For emissions of CO₂ there is a 15% reduction compared with diesel, for CO and NO_x the reductions are about 17%, for VOC the reduction is 16%, for emissions of particulates and CH₄ the reductions are about 22% while in the case of SO_x the reduction is 52%. The only exception to the trend occurs in the emissions of N₂O where there was a total increase of 0,5% compared with the emissions verified for diesel.



Índice geral

Índice de figuras	9
Índice de tabelas	13
Nomenclatura	18
Capítulo 1. Introdução	19
1.2. Objectivos.....	20
1.3. Estrutura.....	21
Capítulo 2. O Biodiesel, propriedades e matérias primas	22
2.1. Biocombustíveis no sector dos transportes	22
2.2. Benefícios/desvantagens do biodiesel.....	26
2.3. Propriedades do biodiesel	26
2.4. Composição do Biodiesel	30
2.4.1. Óleos vegetais.....	30
2.4.2. Ácidos gordos	30
2.4.3. Triglicerídeos.....	31
2.5. Matérias primas	32
2.5.1. Óleos vegetais convencionais	33
2.5.2. Óleos vegetais alternativos.....	39
2.5.3. Óleos alimentares usados	39
2.5.4. Óleo de micro-algas.....	40
2.6. Reacções presentes na produção de biodiesel.....	41
2.6.1. Reacções de transesterificação de triglicerídeos.....	41
2.6.2. Reacções de esterificação de ácidos gordos.....	44
2.6.3. Catalisadores	44
2.6.4. Variáveis da reacção de transesterificação	45
2.7. Processos da produção industrial de biodiesel	48
2.7.1. Processo geral de transesterificação	48
2.7.1. Processo de esterificação.....	51
2.7.2. Processo combinado de esterificação–transesterificação	51
2.7.3. Processo em condições super-críticas	52
2.8. Produção de biodiesel em Portugal.....	53
Capítulo 3. Análise de ciclo de vida.....	57
3.1. Benefícios de um estudo ACV	58



3.2. Limitações de um estudo ACV.....	60
Capítulo 4. Metodologia	61
4.1. Plano de trabalho.....	61
4.2. O modelo GREET	64
Capítulo 5. O modelo MACVC.....	69
5.1. Estrutura do modelo MACVC.....	70
5.1.1. Folha de rosto.....	70
5.1.2. Dados de entrada	71
5.1.3. Dados dos combustíveis.....	73
5.1.4. Factores de emissão.....	75
5.1.5. Petróleo	77
5.1.6. Carvão	80
5.1.7. Electricidade	82
5.1.8. Transportes.....	84
5.1.9. Químicos.....	86
5.1.10. Biodiesel	87
5.1.11. Veículos	91
5.1.12. Resultados.....	94
5.1.13. Gráficos	95
Capítulo 6. Aplicação prática do MACVC	96
6.1. Pressupostos do caso de estudo.....	96
6.2. Resultados e discussão	97
6.2.2. Análise de ciclo de vida do biodiesel	101
Capítulo 7. Conclusões	140
Capítulo 8. Bibliografia	145
Capítulo 9. Anexos	148



Índice de figuras

Figura 1. Produção mundial de biocombustíveis.....	23
Figura 2. Consumo de energia final por sector em Portugal.	23
Figura 3. Evolução do consumo de energia por sector em Portugal.	24
Figura 4. Forma isomérica de triglicerídeos compostos com dois ácidos gordos diferntes.	32
Figura 5. Pormenor de uma planta de colza.....	34
Figura 6. Principais produtores europeus de colza.	35
Figura 7. Pormenor de um girassol.	36
Figura 8. Pormenor de uma planta de soja.	37
Figura 9. Pormenores de plantas de <i>Cynara cardunculus</i> (esq.) e <i>Brassica carinata</i> (dta.).	39
Figura 10. Esquema de processo de cultura de microalgas.....	40
Figura 11. Reacção de transesterificação.	41
Figura 12. Reacções implicadas na transesterificação.	42
Figura 13. Reacção de saponificação.	43
Figura 14. Reacção de neutralização de ácidos gordos livres.	43
Figura 15. Reacção de esterificação.	44
Figura 16. Vantagens e desvantagens dos catalisadores utilizados na transesterificação.	45
Figura 17. Processo de transesterificação em descontínuo.....	49
Figura 18. Processo de transesterificação em contínuo.....	50
Figura 19. Processo de esterificação.	51
Figura 20. Processo combinado esterificação - transesterificação.....	52
Figura 21. Processo de produção de biodiesel mediante processo supercrítico.	52
Figura 22. Fábrica de biodiesel da Iberol.	54
Figura 23. Fábrica de biodiesel da Prio Biocombustíveis em Aveiro.....	55
Figura 24. Estágios do ciclo de vida de um produto.....	57
Figura 25. Fases de uma ACV.	58
Figura 26. Fluxograma do plano de trabalho da dissertação.	63
Figura 27. Calendarização do plano de trabalho da dissertação.....	64



Figura 28. Diagrama representativo das vias de produção de combustíveis consideradas no GREET.....	67
Figura 29. Aspecto da folha inicial do GREET 1.7 – <i>Overview</i>	68
Figura 30. Aspecto da folha de dados de entrada do GREET 1.7 – <i>Inputs</i>	68
Figura 31. Aspecto global da folha de rosto do MACVC.	70
Figura 32. Aspecto global da folha <i>Dados de entrada</i>	71
Figura 33. Dados relativos ao transporte de matérias primas e combustíveis.	72
Figura 34. Dados relativos à simulação a efectuar.....	73
Figura 35. Aspecto global da folha <i>Dados dos combustíveis</i>	73
Figura 36. Diagrama representativo dos cálculos efectuados na folha <i>Transportes</i>	85
Figura 37. Distribuição do consumo energético na produção de biodiesel. ...	109
Figura 38. Comparação de emissões de CO com cada combustível aplicado ao veículo Euro II.	111
Figura 39. Comparação de emissões de CO com cada combustível aplicado ao veículo Euro IV.....	111
Figura 40. Comparação de emissões de NOx com cada combustível aplicado ao veículo Euro II.	112
Figura 41. Comparação de emissões de NOx com cada combustível aplicado ao veículo Euro IV.....	112
Figura 42. Comparação de emissões de PM10 com cada combustível aplicado ao veículo Euro II.	113
Figura 43. Comparação de emissões de PM10 com cada combustível aplicado ao veículo Euro IV.....	113
Figura 44. Comparação de emissões de CO2 com cada combustível aplicado ao veículo Euro II.	114
Figura 45. Comparação de emissões de CO2 com cada combustível aplicado ao veículo Euro IV.....	114
Figura 46. Gráfico comparativo dos consumos energéticos totais na produção e distribuição de combustíveis (poço à bomba).	115
Figura 47. Gráfico comparativo dos consumos energéticos totais na produção e distribuição de gasóleo e biodiesel (poço à bomba).	116



Figura 48. Gráfico comparativo das emissões de VOC totais na produção e distribuição de gasóleo e biodiesel (poço à bomba).	117
Figura 49. Gráfico comparativo das emissões de CO totais na produção e distribuição de gasóleo e biodiesel (poço à bomba).	118
Figura 50. Gráfico comparativo das emissões de NOx totais na produção e distribuição de gasóleo e biodiesel (poço à bomba).	119
Figura 51. Gráfico comparativo das emissões de PM10 totais na produção e distribuição de gasóleo e biodiesel (poço à bomba).	120
Figura 52. Gráfico comparativo das emissões de SOx totais na produção e distribuição de gasóleo e biodiesel (poço à bomba).	121
Figura 53. Gráfico comparativo das emissões de CH4 totais na produção e distribuição de gasóleo e biodiesel (poço à bomba).	122
Figura 54. Gráfico comparativo das emissões de N2O totais na produção e distribuição de gasóleo e biodiesel (poço à bomba).	123
Figura 55. Gráfico comparativo das emissões de CO2 totais na produção e distribuição de gasóleo e biodiesel (poço à bomba).	124
Figura 56. Gráfico comparativo das emissões de VOC totais no ciclo de vida do gasóleo e do biodiesel (poço às rodas).....	129
Figura 57. Gráfico comparativo das emissões de CO totais no ciclo de vida do gasóleo e do biodiesel (poço às rodas).....	130
Figura 58. Gráfico comparativo das emissões de NOx totais no ciclo de vida do gasóleo e do biodiesel (poço às rodas).....	131
Figura 59. Gráfico comparativo das emissões de PM10 totais no ciclo de vida do gasóleo e do biodiesel (poço às rodas).....	132
Figura 60. Gráfico comparativo das emissões de SOx totais no ciclo de vida do gasóleo e do biodiesel (poço às rodas).....	133
Figura 61. Gráfico comparativo das emissões de CH4 totais no ciclo de vida do gasóleo e do biodiesel (poço às rodas).....	134
Figura 62. Gráfico comparativo das emissões de N2O totais no ciclo de vida do gasóleo e do biodiesel (poço às rodas).....	135
Figura 63. Gráfico comparativo das emissões de CO2 totais no ciclo de vida do gasóleo e do biodiesel (poço às rodas).....	136



Figura 64. Gráfico comparativo dos impactos directos no efeito estufa do ciclo de vida do gasóleo e do biodiesel (poço às rodas).	137
Figura 65. Gráfico comparativo das emissões responsáveis pela acidificação da atmosfera do ciclo de vida do gasóleo e do biodiesel (poço às rodas). ..	138



Índice de tabelas

Tabela 1. Produção de biodiesel na UE.	25
Tabela 2. Propriedades do Biodiesel.....	28
Tabela 3. Ácidos gordos saturados mais comuns.....	31
Tabela 4. Ácidos gordos insaturados mais comuns.	31
Tabela 5. Maiores produtores mundiais de colza.....	35
Tabela 6. Principais produtores mundias de soja.....	37
Tabela 7. Principais produtores mundiais de palma.....	38
Tabela 8. Dados de consumo energético na produção de biodiesel.	54
Tabela 9. Características técnicas da fábrica da Iberol.....	55
Tabela 10. Dados de consumo energético na produção de biodiesel.....	56
Tabela 11. Características técnicas da fábrica da Prio Biocombustíveis.	56
Tabela 12. Propriedades de combustíveis líquidos na <i>folha Dados dos combustíveis</i>	74
Tabela 13. Propriedades de combustíveis gasosos e sólidos na <i>folha Dados dos combustíveis</i>	74
Tabela 14. Factores de aquecimento global na <i>folha Dados dos combustíveis</i>	75
Tabela 15. Factores de emissão para tecnologias de combustão estacionárias (parte I).....	76
Tabela 16. Factores de emissão para tecnologias de combustão estacionárias (parte II).....	76
Tabela 17. Factores de emissão para tecnologias de combustão estacionárias (parte III).....	76
Tabela 18. Factores de emissão para navios de transporte internacional.	77
Tabela 19. Peso relativo das tecnologias de combustão aplicadas no processo de produção de combustíveis.	78
Tabela 20. Peso relativo dos combustíveis utilizados na <i>folha Petróleo</i>	79
Tabela 21. Valores de eficiência global e emissões urbanas tomados na <i>folha Petróleo</i>	79
Tabela 22. Peso relativo das tecnologias de combustão aplicadas no processo de extracção de carvão.....	80



Tabela 23. Peso relativo dos combustíveis utilizados no processo de extracção de carvão.	81
Tabela 24. Eficiência global e emissões associadas ao processo de extracção de carvão.	81
Tabela 25. Quotas de produção de energia eléctrica em Portugal por fonte de energia.	82
Tabela 26. Peso relativo dos combustíveis na produção eléctrica em Portugal.	82
Tabela 27. Pesos relativos e eficiências das tecnologias de combustão na produção eléctrica.	83
Tabela 28. Peso relativo das tecnologias de combustão aplicadas na de produção de químicos agrícolas.	86
Tabela 29. Produtividades dos processos associados à produção de biodiesel de colza.	88
Tabela 30. Peso relativo das tecnologias de combustão aplicadas na de produção de biodiesel.	88
Tabela 31. Peso relativo dos combustíveis utilizados na produção agrícola.	89
Tabela 32. Consumos energéticos por combustível na fase de produção agrícola.	89
Tabela 33. Dosagem de fertilizantes, herbicidas e insecticidas.	89
Tabela 34. Consumo de combustíveis no processo de extracção de óleo.	90
Tabela 35. Consumo de combustíveis no processo de transesterificação.	90
Tabela 36. Dados dos veículos a simular.	96
Tabela 37. Velocidades médias dos percursos.	97
Tabela 38. Resultados obtidos no MACVC para consumo de gasóleo da linha 24.	98
Tabela 39. Consumo de gasóleo fornecido pelos TUB.	98
Tabela 40. Comparação dos consumos de gasóleo calculados no MACVC com os consumos estatísticos fornecidos pelos TUB para a linha 24.	98
Tabela 41. Resultados obtidos no MACVC para emissões gasosa da linha 24 no cenário base.	99
Tabela 42. Resultados obtidos no MACVC para emissões gasosa da linha 24 no cenário 1.	99



Tabela 43. Resultados obtidos no MACVC para emissões gasosa da linha 24 no cenário 2.	99
Tabela 44. Resultados obtidos no MACVC para consumo de gasóleo da linha 34.	100
Tabela 45. Comparação dos consumos de gasóleo calculados no MACVC com os consumos estatísticos fornecidos pelos TUB para a linha 34.	100
Tabela 46. Resultados obtidos no MACVC para emissões gasosas da linha 34.	100
Tabela 47. Consumos energéticos de cada processo individual por combustível (J/kWhproduzido).	102
Tabela 48. Consumo total de energia de cada processo de produção de combustíveis (kJ/kWhproduzido).	102
Tabela 49. Emissões decorrentes dos processos de extracção e produção de combustíveis (g/kWhproduzido).	102
Tabela 50. Origem do crude utilizado nas refinarias de Sines e Porto.	103
Tabela 51. Consumos globais de energia para transporte de combustíveis (J/kWhtransportado).	103
Tabela 52. Consumos globais de energia para distribuição de combustíveis (J/kWhtransportado).	104
Tabela 53. Emissões gasosas globais para transporte de combustíveis (g/kWhtransportado).	104
Tabela 54. Emissões gasosas globais para distribuição de combustíveis (g/kWhtransportado).	104
Tabela 55. Consumo energético global da produção eléctrica em Portugal. .	105
Tabela 56. Emissões globais associadas à produção eléctrica em Portugal.	105
Tabela 57. Consumos energéticos totais (kJ/kggrão) na produção agrícola de colza.	106
Tabela 58. Emissões gasosas totais (g/kggrão) na produção agrícola de colza.	106
Tabela 59. Consumos energéticos totais (kJ/kgBD) na extracção de óleo de colza.	106
Tabela 60. Emissões gasosas totais (g/kgBD) na extracção de óleo de colza.	107



Tabela 61. Consumos energéticos totais (kJ/kgBD) na transesterificação.....	107
Tabela 62. Emissões gasosas totais (g/kgBD) na transesterificação.....	108
Tabela 63. Consumos energéticos totais (kJ/kWh) na produção de biodiesel.	108
Tabela 64. Consumo de gasóleo dos veículos considerados na linha 24.....	109
Tabela 65. Emissões gasosas dos veículos considerados na linha 24 movidos a gasóleo.....	109
Tabela 66. Variações de emissões gasosas mediante uso de biodiesel.....	110
Tabela 67. Emissões gasosas do autocarro Euro II com B100, B50 e B3.	110
Tabela 68. Emissões gasosas do autocarro Euro IV com B100, B50 e B3....	110
Tabela 69. Consumos energéticos totais do "poço à bomba" do gasóleo e biodiesel.	117
Tabela 70. Emissões gasosas totais do "poço à bomba" do gasóleo e biodiesel.	124
Tabela 71. Consumos energéticos totais do "poço às rodas" associados à utilização de gasóleo em autocarros Euro II.	125
Tabela 72. Consumos energéticos totais do "poço às rodas" associados à utilização de gasóleo em autocarros Euro IV.	125
Tabela 73. Consumos energéticos totais do "poço às rodas" associados à utilização de biodiesel B100 em autocarros Euro II.	126
Tabela 74. Consumos energéticos totais do "poço às rodas" associados à utilização de biodiesel B100 em autocarros Euro IV.	126
Tabela 75. Consumos energéticos totais do "poço às rodas" associados à utilização de biodiesel B50 em autocarros Euro II.	127
Tabela 76. Consumos energéticos totais do "poço às rodas" associados à utilização de biodiesel B50 em autocarros Euro IV.	127
Tabela 77. Consumos energéticos totais do "poço às rodas" associados à utilização de biodiesel B30 em autocarros Euro II.	128
Tabela 78. Consumos energéticos totais do "poço às rodas" associados à utilização de biodiesel B30 em autocarros Euro IV.	128
Tabela 79. Variações das emissões do "poço à bomba" do biodiesel em relação ao gasóleo.....	142



Tabela 80. Variações das emissões totais do "poço às rodas" do biodiesel em relação ao gasóleo.....	143
---	-----



Nomenclatura

Ao longo do trabalho apresentado são utilizadas uma série de abreviaturas e siglas que:

- ACV – Análise de Ciclo de Vida
- BD100 – Biodiesel a 100%
- BD50 – Biodiesel a 50% em volume
- BD30 – Biodiesel a 30% em volume
- CH₄ – Metano
- CO – Monóxido de Carbono
- CO₂ – Dióxido de Carbono
- CSTR – Continuous Stirred Tank Reactor
- EF – Factor de Emissão
- FFA – Ácidos Gordos Livres
- GREET – Greenhouse gases, Regulated Emissions and Energy use in Transportation
- KOH – Hidróxido de Potássio
- K₂O – Óxido de Potássio
- MACVC – Modelo de Análise de Ciclo de Vida de Combustíveis
- N – Azoto
- NaOH – Hidróxido de Sódio
- NO_x – Óxidos de Azoto
- N₂O – Óxido Nitroso
- PCI – Poder Calorífico Inferior
- PFR – Plug Flow Reactor
- PM – Partículas
- P₂O₅ – Pentóxido de Sódio
- SO_x – Óxidos de Enxofre
- TUB – Transportes Urbanos de Braga
- VOC – Compostos Orgânicos Voláteis



Capítulo 1. Introdução

O planeta em que vivemos encontra-se em constante evolução e a presença do ser humano desempenha, cada vez mais, um importante papel em todo este processo evolutivo. A acção humana no planeta gira em torno da transformação e alocação dos recursos naturais disponíveis, numa enorme cadeia produtiva que movimenta a economia mundial em benefício do bem estar da nossa espécie.

Os seres humanos, geradores de actividades modificadoras do meio ambiente, vivem num processo de acelerada urbanização, na qual se pode observar o aumento da quantidade de pessoas a viver e trabalhar nos centros urbanos. Este fenómeno gera uma crescente necessidade de fluxos de pessoas e bens através de diversos meios de transporte. Estes, por sua vez, desempenham um papel fundamental dentro de um contexto ambiental, visto que as suas emissões são prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana.

Com a concentração da maioria da população em determinadas regiões, torna-se cada vez mais agravante a tendência de degradação da qualidade do ar nos centros urbanos. Tal facto proporciona significativos danos à saúde humana, influenciados tanto pelos factores qualitativos e quantitativos da fonte de emissão, como também pelos factores climáticos e topográficos que determinam uma maior ou menor dispersão dos poluentes (Marzullo, 2007).

As emissões atmosféricas, provenientes da queima de combustíveis fósseis são, para além de um problema para a saúde pública um verdadeiro perigo para o equilíbrio do nosso planeta.

Em termos mundiais, o efeito de estufa destaca-se como o principal problema para o meio ambiente, devido ao aumento da concentração de determinados gases na atmosfera que geram o aquecimento global. O impacto ambiental causado pelos derivados do petróleo aumenta com a concentração de dióxido de carbono na atmosfera, comprovando a necessidade cada vez mais urgente da busca de substitutos viáveis para os combustíveis fósseis.

Por outro lado, o crescente consumo energético da sociedade humana tem vindo a exaurir as reservas existentes de combustíveis fósseis sejam elas de carvão, gás natural ou petróleo. Estas reservas levam eras geológicas para se reporem, não sendo portanto renováveis à escala da vida humana e o seu esgotamento é inevitável. Este problema, aliado ao preço crescente dos combustíveis fósseis, leva a que seja cada vez mais importante o desenvolvimento e implementação de energias renováveis.

Neste contexto, os óleos vegetais aparecem como uma verdadeira alternativa para a substituição do gasóleo em motores de ignição por compressão, sendo o seu uso testado já em fins do século XIX (*Ferrari et al*, 2005), produzindo resultados satisfatórios no próprio motor diesel. Esta possibilidade de emprego de combustíveis de origem agrícola em motores do



ciclo diesel é bastante atractiva tendo em vista o aspecto ambiental, por serem uma fonte renovável de energia e pelo facto do seu desenvolvimento permitir a redução da dependência de importações de petróleo.

Uma das formas de utilizar óleos vegetais para fins carburantes é através do biodiesel, uma mistura de ésteres obtida basicamente na reacção de transesterificação entre um triglicerídeo (óleos de origem vegetal ou animal) e um álcool de cadeia curta.

A preocupação com questões ambientais, num contexto de desenvolvimento sustentável, fez com que a análise dos principais impactos negativos causados pela acção do homem esteja cada vez mais presente em atitudes pro-activas de prevenção da poluição e desenvolvimento de tecnologias limpas. Um dos principais métodos de análise de impactos ambientais de determinado produto é a Análise de Ciclo de Vida (ACV).

Este trabalho de Dissertação de Mestrado visa apresentar uma ferramenta numérica de Análise de Ciclo de Vida do Biodiesel adaptada à realidade nacional.

1.2. Objectivos

O principal objectivo deste trabalho de Dissertação de Mestrado consiste na actualização da ferramenta numérica de análise de ciclo de vida GREET, desenvolvida pelo *Argonne National Laboratory*. Esta actualização terá como propósito a adaptação do software de modo a contemplar a realidade nacional no que se refere ao ciclo de vida do biodiesel.

No desenvolvimento do trabalho serão tidos em conta todos os aspectos relacionados com a produção do biodiesel, desde a produção e transporte de matéria-prima, até à produção, distribuição do produto final e seu consumo nos veículos rodoviários.

A base de dados criada deverá contemplar todas as entradas ao longo de todo o processo de produção, sejam elas de matérias-primas, fertilizantes, energia, água entre outras, assim como todas as emissões desde gases poluentes a gases de efeito estufa.



1.3. Estrutura

O presente trabalho encontra-se dividido em 10 capítulos ao longo dos quais são abordados os vários temas apresentados.

O **capítulo 1** está reservado para a introdução do tema da dissertação e os seus objectivos.

No **capítulo 2** é apresentada a pesquisa bibliográfica que serve de fundamentação teórica relativa a biocombustíveis, desde propriedades, matérias primas, principais produtores, vantagens e desvantagens.

O **capítulo 3** é dedicado à Análise de Ciclo de Vida e seus princípios teóricos fundamentais.

No **capítulo 4** é apresentada a metodologia de base e o plano de trabalho para a execução do trabalho proposto. Neste capítulo é ainda apresentado e descrito o funcionamento do modelo numérico de análise de ciclo de vida GREET.

No **capítulo 5** é apresentado o modelo MACVC criado a partir do GREET. Neste capítulo são descritos todos os pressupostos e considerações tidas em conta no modelo.

No **capítulo 6** é apresentado um caso prático de aplicação do novo modelo e são feitas comparações com resultados obtidos através da utilização de outros programas.

O **capítulo 7** é dedicado às conclusões tiradas do estudo realizado, bem como às limitações observadas no modelo e a trabalho que ainda há para fazer no seu desenvolvimento.

No **capítulo 8** são apresentadas as referências bibliográficas consultadas ao longo da realização do trabalho.

O **capítulo 9** é reservado à apresentação de material anexo ao trabalho.



Capítulo 2. O Biodiesel, propriedades e matérias primas

Neste capítulo serão abordados os conceitos e aspectos teóricos inerentes ao trabalho desenvolvido nesta dissertação. Serão abordadas as principais propriedades do biodiesel assim como as principais matérias primas utilizadas na produção do combustível, com especial relevo para a colza que será a matéria prima foco deste trabalho.

2.1. Biocombustíveis no sector dos transportes

Na actualidade, os recentes desenvolvimentos indicam que o uso de biocombustíveis sofreu uma autêntica revolução à escala mundial, desde países como Brasil, Estados Unidos, China e a União Europeia. A principal barreira, embora não a única, à massificação dos biocombustíveis continua a ser o seu custo de produção.

As actuais políticas de introdução de biocombustíveis no sector dos transportes são bastante ambiciosas, podendo-se destacar algumas verificadas em variados países:

- Na União Europeia, 5,75% dos combustíveis fósseis deverão ser substituídos por biocombustíveis até 2010 e em 2020 esse valor será estendido para 8% (Comissão Europeia, 2006).
- Nos Estados Unidos, prevê-se um peso de 4% de biocombustíveis em 2010 e de 20% em 2030 (APPA, 2005).
- No Brasil é obrigatória a utilização de uma mistura com 25% de bioetanol em gasolina (APPA, 2005).
- No Canadá é obrigatória a utilização de misturas contendo teores entre 7,5 a 10% de bioetanol em gasolina (APPA, 2005).
- Na China, em várias províncias é obrigatória uma mistura com 10% de bioetanol em gasolina (APPA, 2005).
- Na Argentina, é obrigatória a utilização de uma mistura com 5% de bioetanol em gasolina (APPA, 2005).
- Na Colômbia, nos grandes centros urbanos, é obrigatória a utilização de uma mistura com 10% de bioetanol em gasolina (APPA, 2005).
- Na Tailândia, mais concretamente na capital Bangkok, é obrigatória a utilização de uma mistura contendo 10% de bioetanol em gasolina (APPA, 2005).



Estes números reflectem a crescente importância que é dada aos biocombustíveis como substitutos aos combustíveis fósseis capazes de ajudar a reduzir de forma significativa a dependência em petróleo das economias mundiais.

A nível mundial, o produto com maior incidência em termos de utilização é o bioetanol, com o Brasil e os E.U.A. à cabeça dos maiores produtores mundiais.

No caso do biodiesel, verifica-se um grande aumento de utilização, sendo que esta se encontra principalmente concentrada na União Europeia, embora desde 2004 se tenha iniciado no Brasil um programa de fomentação do biodiesel. Os maiores produtores mundiais de biodiesel são a Alemanha e a França.

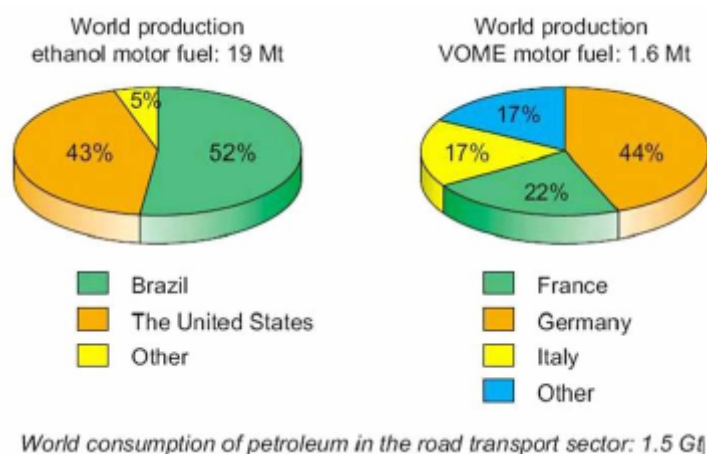


Figura 1. Produção mundial de biocombustíveis.

Fonte: IFP, 2005

O sector dos transportes representa, actualmente em Portugal cerca de 37% do consumo final de energia (REA, 2003) e as perspectivas em relação a estes números são de crescimento.



Figura 2. Consumo de energia final por sector em Portugal.

Fonte: IEA statistics



Uma vez que a grande maioria desta energia advém da combustão de combustíveis fósseis, este sector torna-se problemático pelos seus impactos a nível de poluição atmosférica. No que concerne à emissão de gases de efeito estufa, o sector dos transportes é o que detém a maior quota e ainda se encontra em crescimento. Nos países industrializados o transporte rodoviário é a maior fonte de emissões de CO₂, sendo metade destas emissões provocadas pelo tráfego nos centros urbanos. Em média, na Comunidade Europeia, 50% das emissões de CO₂ são causadas por carros particulares e cerca de 36% pelo transporte rodoviário de mercadorias (EEA, 2006).

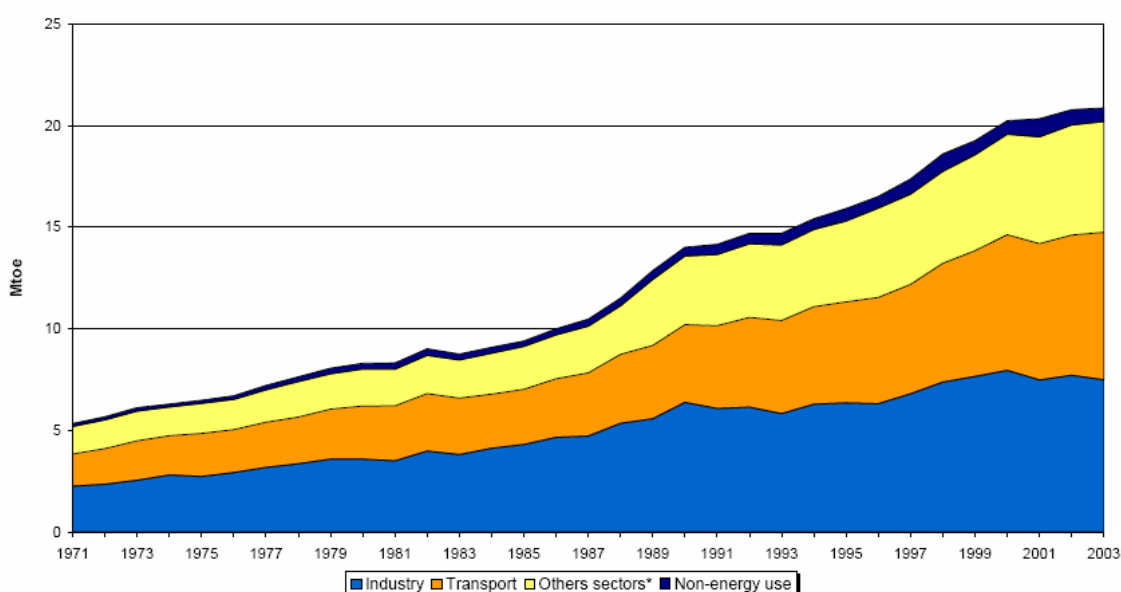


Figura 3. Evolução do consumo de energia por sector em Portugal.

Fonte: IEA statistics

Os problemas relacionados com o aquecimento global do planeta, as alterações climáticas e a constante escalada dos preços do petróleo e seus derivados levam à necessidade cada vez mais urgente de substituição dos combustíveis fósseis convencionais. Nesta perspectiva, os biocombustíveis apresentam-se como sendo as alternativas mais viáveis a curto/médio prazo. Estes são substitutos directos e imediatos para os combustíveis líquidos utilizados no sector de transportes e podem facilmente ser integrados nos sistemas logísticos actualmente em operação. Actualmente, na União Europeia, são produzidos anualmente cerca de 3 milhões de toneladas de biodiesel e cerca de 830 mil toneladas de bioetanol (EBB, 2006). Estes números encontram-se ainda muito longe das metas almejadas pela directiva 2003/30 de Maio de 2003 da UE, onde é estipulado que até 2010 sejam substituídos 5,75% de combustíveis fósseis (gasolina e gasóleo) por biocombustíveis (bioetanol e biodiesel).



País	2004	2005
Alemanha	1.035.000	1.669.000
França	348.000	492.000
Itália	320.000	396.000
República Checa	60.000	133.000
Polónia	0	100.000
Áustria	57.000	85.000
Eslováquia	15.000	78.000
Espanha	13.000	73.000
Dinamarca	70.000	71.000
Reino Unido	9.000	51.000
Eslovénia	0	8.000
Estónia	0	7.000
Lituânia	5.000	7.000
Letónia	0	5.000
Grécia	0	3.000
Malta	0	2.000
Bélgica	0	1.000
Suécia	1.400	1.000
Chipre	0	1.000
Portugal	0	1.000
Total UE	1.933.400	3.184.000

Tabela 1. Produção de biodiesel na UE.

Fonte: EBB, 2006

Outro importante incentivo à implementação de biocombustíveis nos transportes vem da necessidade de reduzir as emissões de CO₂ reforçada pelos compromissos impostos pelo protocolo de Quioto. Com a assinatura deste tratado, a Europa assumiu o compromisso de, até 2012, reduzir as suas emissões de gases de efeito de estufa em 8% em relação aos valores de 1990. No entanto, como a situação geográfica e económico-social dos diversos estados membros é diversa, foram estabelecidas diferentes metas para cada membro. Assim, Portugal pode aumentar as emissões de GEE em 27% das emissões registadas em 1990 (EDP, 2008).

Na UE existem boas condições para a produção em larga escala de biocombustíveis, principalmente biodiesel no qual se foca este trabalho. Estima-se que, para alcançar os níveis de substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis impostos pela directiva 2003/30, serão necessários entre 4% a 12% do total de terra destinada a agricultura (Macias et al). Para conseguir atingir as metas propostas será necessário para além de terra, uma estratégia bem coordenada no sentido de fomentar a produção de biocombustíveis. Para tal é necessário ter em conta as características dos



mercados agrícolas para além dos mercados energéticos. Neste sentido há que destacar que o desenvolvimento da indústria dos biocombustíveis depende não somente da disponibilidade local de matéria prima mas também da existência de uma procura suficiente.

A criação e desenvolvimento de um mercado efectivo de biocombustíveis pode ser aproveitada para potenciar desenvolvimento do sector agrícola levando à criação de empregos no sector primário e consequentemente à fixação de população em zonas rurais. Os proveitos da implementação dos biocombustíveis no sector dos transportes devem então ser vistos não apenas pelo ponto de vista ambiental e económico, mas também pela sua dimensão social.

2.2. Benefícios/desvantagens do biodiesel

Como combustível o biodiesel possui algumas características lhe conferem algumas vantagens sobre os combustíveis derivados do petróleo. Entre estas, podem-se destacar algumas, tais como, a virtual ausência de enxofre e de compostos aromáticos, número de cetano elevado, maior ponto de inflamação, menores emissões de partículas, hidrocarbonetos (HC ou VOC), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂). A adicionar a estas vantagens há ainda o facto de ter um carácter não tóxico e biodegradável, além de ser proveniente de fontes renováveis. O maior inconveniente relacionado com a utilização de biodiesel em motores diesel prende-se com o aumento das emissões de óxidos de azoto (NO_x). A utilização de biodiesel puro (B100) pode conduzir à necessidade de serem levadas a cabo algumas modificações de certos materiais aplicados nos sistemas de injeção de combustível.

O biodiesel tem apresentado uma procura crescente e a sua implementação tem sido impulsionada pelos benefícios que traz principalmente a nível de emissões gasosas. Outro ponto preponderante para a implementação deste combustível está relacionado com a substituição do gasóleo em motores diesel permitindo assim reduções dos níveis de consumo de petróleo no sector dos transportes (Ferrari et al, 2005).

2.3. Propriedades do biodiesel

O biodiesel é um biocombustível líquido produzido a partir de óleos vegetais e gorduras animais, sendo a colza, o girassol, a palma e a soja as matérias primas mais comuns. Estas matérias primas são processadas e posteriormente será produzido biodiesel através de um processo químico adequado de separação de glicerina do óleo vegetal.

As propriedades do biodiesel são praticamente as mesmas que as do gasóleo utilizado no sector dos transportes em termos de densidade e número de cetano, apresentando contudo um ponto de inflamação mais elevado. Dadas as suas semelhanças, o biodiesel e o gasóleo podem ser misturados e



posteriormente ser utilizados em motores de ignição por compressão sem haver necessidade de recurso a adaptações especiais dos mesmos.

A definição de biodiesel proposta pelas especificações ASTM (*American Society for Testing na Material Standart*) descreve-o como sendo um éster monoalcalino de ácidos gordos de cadeia longa derivado de lípidos renováveis tais como óleos vegetais ou gorduras animais com um álcool na presença de um catalizador.

Os ésteres mais utilizados para a produção de biodiesel são os de metanol e de etanol, obtidos a partir da transesterificação de qualquer tipo de óleo vegetal ou gordura animal ou da esterificação de ácidos gordos.

O biodiesel para ser considerado adequado para o uso como combustível automóvel deve, segundo a ASTM, cumprir uma série de especificações que podem ser observadas na tabela seguinte.



Propriedade	Unidades	Limites		Norma de ensaio
		Mínimo	Máximo	
Percentagem de Éster	% (m/m)	96,5	-	EN 14103
Densidade a 15°C	kg/m ³	860	900	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Viscosidade a 40°C	mm ² /g	3,50	5,00	EN ISO 3104
Ponto de inflamação	°C	120	-	EN ISO 3679
Conteúdo de Enxofre	mg/kg	-	10,0	EN ISO 20846 EN ISO 20884
Resíduo de Carbono (em 10% de resíduo destilado)	%	-	0,30	EN ISO 10370
Número de Cetano	-	51,0		EN ISO 5165
Conteúdo de cinzas sulfatadas	% (m/m)	-	0,02	ISO 3987
Conteúdo de água	mg/kg	-	500	EN ISO 12937
Contaminação total	mg/kg	-	24	EN 12662
Corrosão de Cobre (3h a 50°C)	Classificação	Classe 1		EN ISO 2160
Estabilidade à oxidação a 110°C	Horas	6,0	-	EN 14112
Índice de ácido	mg _{KOH} /g	-	0,50	EN 14104
Índice de Iodo	g _{Iodo} /100g	-	120	EN 14111
Éster de metilo de ácido linoleico	% (m/m)	-	12,0	EN 14103
Ésteres de metilo polisaturados	% (m/m)	-	1	-
Conteúdo de metanol	% (m/m)	-	0,20	EN 14110
Conteúdo em monoglicerídeos	% (m/m)	-	0,80	EN 14105
Conteúdo em diglicerídeos	% (m/m)	-	0,20	EN 14105
Conteúdo em triglicerídeos	% (m/m)	-	0,20	EN 14105
Glicerol livre	% (m/m)	-	0,02	EN 14105 EN 14106
Glicerol total	% (m/m)	-	0,25	EN 14105
Metais do grupo I (Na+K)	mg/kg	-	5,0	EN 14108 EN 14109
Metais do grupo II (Ca+Mg)	mg/kg	-	5,0	EN 14538
Conteúdo de fósforo	mg/kg	-	10,0	EN 14107

Tabela 2. Propriedades do Biodiesel.

Fonte: Wearcheckiberica. Boletim Mensal, Setembro de 2004.



As principais propriedades constantes na tabela 2 serão de seguida explicadas de forma resumida:

- **Viscosidade e densidade** – estas propriedades exercem grande influência na circulação e injeção do combustível. As propriedades fluidodinâmicas do biodiesel, independentemente da sua origem, assemelham-se às do diesel.

- **Lubricidade** – é uma medida do poder de lubrificação de uma substância, em função de várias propriedades físicas, destacando a viscosidade e a tensão superficial. Os motores diesel exigem que o combustível tenha propriedades de lubrificação, especialmente, em razão do funcionamento da bomba, exigindo que o líquido escoe e lubrifique adequadamente as peças em movimento.

- **Ponto de inflamação** – é a menor temperatura na qual o biodiesel, ao ser aquecido pela aplicação de uma chama sob condições controladas, gera uma quantidade de vapores que se inflamam. Tal parâmetro, relacionado à inflamabilidade do produto, é um indicativo dos procedimentos de segurança a serem tomados durante o uso, transporte, armazenamento e manuseamento do biodiesel. O ponto de inflamação do biodiesel, se completamente isento de metanol ou etanol, é superior à temperatura ambiente, significando que o combustível não é inflamável nas condições normais em que é transportado.

- **Água e sedimentos** – visa controlar a presença de contaminantes sólidos e água. Os sólidos podem reduzir a vida útil dos filtros dos veículos e prejudicar o funcionamento adequado dos motores. A presença em excesso de água pode contribuir para a elevação de acidez do biodiesel, podendo torná-lo corrosivo.

- **Corrosão de cobre** – trata-se de uma avaliação do carácter corrosivo do biodiesel, ou seja, indica o grau de corrosividade do produto em relação às peças metálicas em ligas de cobre que se encontram presentes nos sistemas de combustível dos veículos e equipamentos.

- **Cinzas sulfatadas** – expressam os resíduos inorgânicos, não combustíveis, resultantes após a queima de uma amostra de biodiesel. As cinzas são basicamente constituídas de sais inorgânicos (óxidos metálicos de sódio ou potássio) que são formados após a combustão do produto e se apresentam como abrasivos. A presença de sódio e potássio no biodiesel indica resíduos do catalizador utilizado durante a reação de transesterificação e que não foram removidos na totalidade no processo de purificação do biodiesel.

- **Número de cetano** – quanto maior for o número de cetano de um combustível, melhor será a combustão deste num motor.

- **Poder calorífico** – o poder calorífico do biodiesel é muito próximo do poder calorífico do óleo diesel mineral. A diferença média em favor do gasóleo situa-se na ordem de 5 a 8%.



O biodiesel deve ainda cumprir uma série de requisitos impostos para os combustíveis minerais destinados ao sector dos transportes reconhecidos na norma europeia EN 590. Os requisitos específicos e os métodos de controlo para a comercialização e distribuição de ésteres metílicos de ácidos gordos para utilização em motores diesel encontram-se na norma EN 14214.

2.4. Composição do Biodiesel

O biodiesel é, como foi referido anteriormente, produzidos principalmente a partir de óleos vegetais dos quais é extraída glicerina através de processos químicos.

2.4.1. Óleos vegetais

Os óleos vegetais são compostos por moléculas de triglicerídeos (TAG) resultantes da condensação de uma molécula de glicerol com três moléculas de ácidos gordos. Os ácidos gordos mais comuns em óleos e gorduras vegetais apresentam cadeias de 16 e 18 átomos de carbono. Estas cadeias de carbono podem ser saturadas ou insaturadas. Tanto a composição química como o grau de insaturação dos óleos vegetais variam conforme a espécie oleaginosa.

2.4.2. Ácidos gordos

Os ácidos gordos ocorrem na natureza como substâncias livres ou esterificadas. A maior parte encontra-se esterificada com o glicerol, formando trigliceróis ou triglicerídeos. Os óleos e gorduras são misturas relativamente complexas de triglicerídeos. As unidades acila, correspondentes aos ácidos gordos, representam cerca de 95% do peso molecular dos triglicerídeos. As propriedades físicas, químicas e nutricionais de óleos e gorduras dependem, fundamentalmente, da natureza, do número de átomos de carbono e posição dos grupos acila presentes nas moléculas de triglicerídeos.



Na tabela seguinte podem-se observar alguns dos ácidos gordos saturados mais comuns.

Nome usual	Fórmula química	Nome científico
Ácido butírico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COOH}$	Ácido butanóico
Ácido valérico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{COOH}$	Ácido pentanóico
Ácido capróico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{COOH}$	Ácido hexanóico
Ácido caprílico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{COOH}$	Ácido octanóico
Ácido cáprico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{COOH}$	Ácido decanóico
Ácido láurico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$	Ácido dodecanóico
Ácido mirístico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$	Ácido tetradecanóico
Ácido palmítico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$	Ácido hexadecanóico
Ácido esteárico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$	Ácido octadecanóico
Ácido araquídico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{18}\text{COOH}$	Ácido eicosanóico
Ácido linocérico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{22}\text{COOH}$	Ácido tetracosanóico

Tabela 3. Ácidos gordos saturados mais comuns.

Seguidamente são apresentados alguns dos ácidos gordos insaturados mais comuns.

Nome usual	Fórmula química
Ácido palmitoleico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
Ácido oleico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
Ácido linoleico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
Ácido linolenico	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$

Tabela 4. Ácidos gordos insaturados mais comuns.

2.4.3. Triglicerídeos

Os triglicerídeos são compostos resultantes da combinação do glicerol (um triálcool), com ácidos gordos, nos quais os três hidroxilos (grupos OH) do glicerol sofrem condensação carboxílica com os ácidos. De forma simplificada, um triglicerídeo é formado pela união de três ácidos gordos a uma molécula de glicerol, cujos três hidroxilos ligam-se aos radicais carboxílicos dos ácidos gordos.

No caso dos três ácidos gordos serem os mesmos, o produto é um triglicerídeo simples, no caso de haverem dois ou mesmo três ácidos gordos diferentes, o triglicerídeo é designado de composto. Quando o triglicerídeo



contém apenas dois ácidos gordos diferentes, possui quatro formas isoméricas, conforme apresentado na figura seguinte.

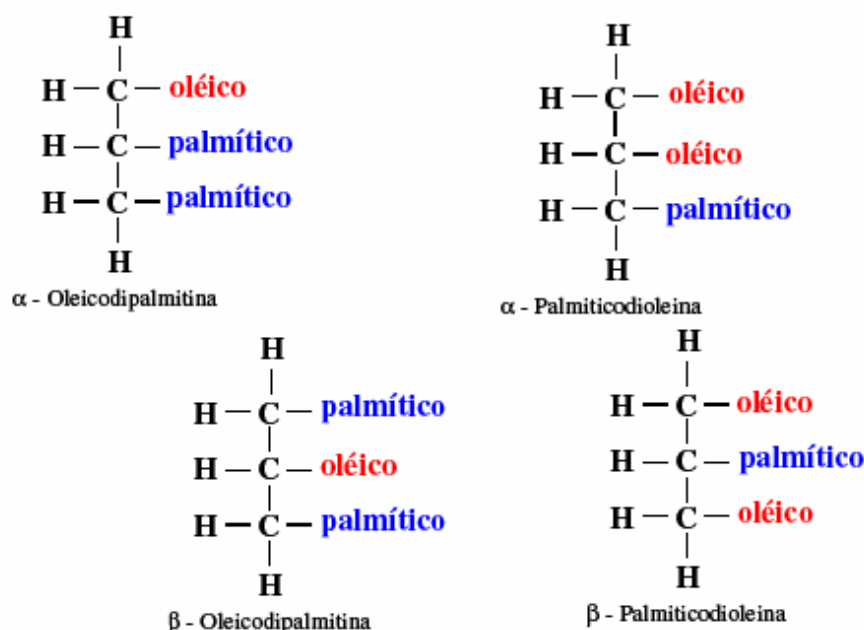


Figura 4. Forma isomérica de triglicerídeos compostos com dois ácidos gordos diferentes.

Fonte: Marzullo, R., 2007

2.5. Matérias primas

Como foi referido na secção anterior, o biodiesel é obtido principalmente a partir de óleos vegetais, entre os quais se destacam os óleos de colza, girassol, palma e soja. Para além dos óleos vegetais podem ser utilizadas gorduras animais e ainda óleos alimentares usados, ganhando a última opção uma grande importância do ponto de vista ecológico ao dar um destino final a estes óleos.

Os óleos vegetais referidos anteriormente são, à excepção do óleo de soja que provém de uma leguminosa, provenientes de plantas oleaginosas. Contudo, de um modo geral toda a matéria que contenha triglicerídeos pode ser utilizada para produzir biodiesel.



As principais matérias primas utilizadas na produção de biodiesel serão de seguida enumeradas:

- **Óleos vegetais convencionais**

- Óleo de colza
- Óleo de girassol
- Óleo de soja
- Óleo de coco
- Óleo de palma

- **Óleos vegetais alternativos**

- Óleo de Brassica carinata
- Óleo de Cynara cardunculus
- Óleo de Camelina sativa
- Óleo de Crambe abyssinica
- Óleo de Pongamia
- Óleo de Jatropha curcas

- **Gorduras animais**

- Sebo de vaca
- Sebo de búfalo

- **Óleos alimentares usados**

- **Óleos provenientes de outras fontes**

- Óleo de produções microbianas
- Óleo de micro-algas

2.5.1. Óleos vegetais convencionais

As matérias primas utilizadas convencionalmente na produção de biodiesel são provenientes de óleos de sementes oleaginosas e óleos de frutos oleaginosos. No caso das sementes oleaginosas as principais são a colza e o girassol (Europa), a soja (Estados Unidos), enquanto que a palma (Malásia e Indonésia) é a fruta oleaginosa mais utilizada.

A utilização de óleos vegetais para produção de biodiesel na Europa tem estado associada às regulações de retirada obrigatória de terras impostas pela Política Agrária Comum (PAC), permitindo o cultivo de sementes oleaginosas a preços razoáveis.



Colza

A colza é uma planta herbácea pertencente à família das crucíferas e, no seio desta, pertence ao género *Brassica* que engloba várias espécies cultivadas tanto para usos hortícolas como para a produção de óleos e de condimentos. Pertencem também a este género a mostarda, a couve, a couve-flor e o nabo (TAGOL, 2006).



Figura 5. Pormenor de uma planta de colza.

Fonte: www.Wikipedia.com

Existem duas espécies conhecidas pela denominação de colza: *brassica napus* var. *oleífera* e *brassica campestris*, ainda que esta esteja normalmente associada à primeira.

Uma das principais características que torna o cultivo de colza atractivo é o facto de esta ser uma planta bastante resistente à temperatura, apresentando grande aptidão para quase todos os climas mundiais. Esta é capaz de suportar temperaturas bastante baixas, embora numa fase inicial de germinação não sejam aconselháveis temperaturas inferiores a -3°C . Para além de ser tolerante a baixas temperaturas é também resistente a secas e a chuvas abundantes. Outro aspecto importante desta planta advém do facto de não ser exigente a nível de solos, podendo mesmo ser plantada em solos ácidos sem qualquer problema.

É uma cultura tradicional em muitos países da Europa (França, Alemanha, Polónia, Suécia, Roménia, etc.), da América do Norte (Canadá) e tem dados os primeiros passos de implantação de no Sul da Europa (Portugal e Espanha) acompanhando o crescimento de produção e utilização de biodiesel. Na tabela seguinte podem ser observados os principais produtores mundiais de colza.



Produtor	Produção (kton)
China	12649
Canadá	9105
Índia	8130
Alemanha	5336
França	4145
Reino Unido	1870
Polónia	1652
Rep. Checa	880
E.U.A.	718
Rússia	522

Tabela 5. Maiores produtores mundiais de colza.

Fonte: UN Food & Agriculture Organisation

A nível europeu a produção a produção de colza está repartida segundo o indicado na seguinte figura.

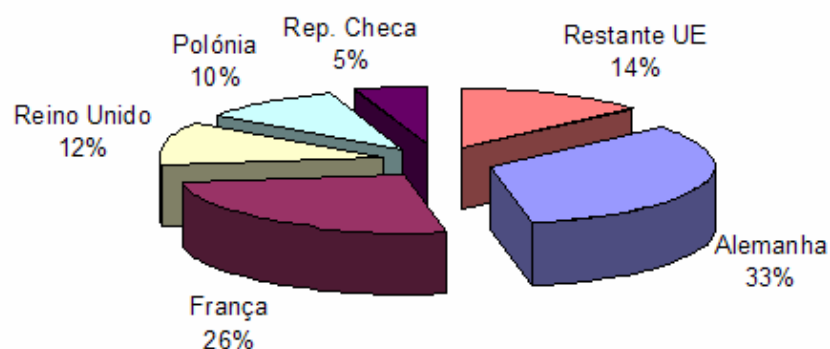


Figura 6. Principais produtores europeus de colza.

Fonte: UN Food & Agriculture Organisation

No início da década de 80 a semente de colza foi geneticamente modificada de forma a eliminar o conteúdo de ácido erúico e glucosinato. Estes compostos estão associados com problemas para a saúde humana assim como a qualidade do óleo obtido.



Girassol

O girassol é uma planta anual de semente oleaginosa da família das asteraceae, de flores grandes (com aproximadamente 30 cm de diâmetro), cujo caule pode atingir até 3 m de altura. Uma particularidade que caracteriza esta planta reside no facto de esta seguir o sol, este comportamento vegetal é conhecido por heliotropismo (Embrapa, 2007).



Figura 7. Pormenor de um girassol.

Fonte: Wikipedia

A cultura do girassol é pouco exigente em calor, desenvolvendo-se numa faixa de temperatura relativamente ampla, não se notando grandes quebras de produtividade em temperaturas entre 18 e 32°C. Embora não seja reconhecida por ser muito resistente à seca, apresentam-se ainda assim, em alguns casos, resultados satisfatórios em plantações atingidas por períodos de seca.

Esta é uma planta originária da América do Norte, tendo sido introduzida na Europa através da Espanha no século XVI disseminando-se por todo o continente até à Rússia tornando-se mesmo o maior produtor mundial. Para além da Rússia os maiores produtores mundiais de girassol são a Ucrânia, Argentina, China, Índia, Estados Unidos e França.



Soja

A soja é uma planta herbácea pertencente à família das leguminosas. A sua semente é rica em substâncias proteicas e gordas e o óleo obtido a partir do seu grão é rico em ácidos gordos insaturados, contendo em maior proporção ácido linoleico (<http://www.biodieselbr.com>).



Figura 8. Pormenor de uma planta de soja.

Fonte: Wikipedia

A soja é uma das principais fontes de óleo vegetal do mundo, esta tem sido cultivada comercialmente tanto para fins alimentares como para fins energéticos.

Actualmente a soja é amplamente cultivada em vários países do mundo. Os principais produtores mundiais são os Estados Unidos seguidos pelo Brasil, Argentina e China.

Produtor	Produção (kton)
E.U.A.	75028
Brasil	31357
Argentina	18718
China	13758
Índia	6100
Paraguai	2856
Canadá	2737
Indonésia	1306
Itália	1231
Bolívia	1071

Tabela 6. Principais produtores mundias de soja.

Fonte: UN Food & Agriculture Organisation



Palma

A palma oleaginosa é um fruto extraído de uma palmeira de origem Africana, esta é a principal cultura de fruta oleaginosa do mundo. Foi introduzida ao resto do mundo em meados do século XVI, tendo ganho especial relevo na América do Sul, e principalmente, no Sudeste Asiático (<http://www.biodieselbr.com>).

A cultura de palma requer temperaturas relativamente elevadas e estáveis ao longo de todo ano, assim como abundância de água pelo que é uma cultura quase exclusiva de climas tropicais.

A palma é a principal fonte de óleo vegetal do mundo e é caracterizada pelo seu elevado rendimento de obtenção de óleo de cerca de 3700 kg/ha (<http://www.biodieselbr.com>).

Entre os principais produtores mundiais de palma encontram-se países como a Malásia, Indonésia, Nigéria, Tailândia e Colômbia.

Produtor	Produção (Mton)
Malásia	13610000
Indonésia	11400000
Nigéria	910000
Colômbia	600000
Papua - Nova Guiné	350000
Costa do Marfim	276000
Equador	250000
China	225000
Rep. Dem. do Congo	175000

Tabela 7. Principais produtores mundiais de palma.

Fonte: UN Food & Agriculture Organisation



2.5.2. Óleos vegetais alternativos

Para além das culturas tradicionais para produção de óleos vegetais, existe uma série de outras espécies especialmente adaptadas aos países ou regiões onde se desenvolvem para fins de cultivo energético. Neste contexto destacam-se os óleos de *Camelina sativa*, *Crambe abyssinica*, *Jatropha curcas* e *Brassica carinata* e *Cynara cardunculus* (Camús J., Laborda J., 2007).

Actualmente a *Brassica carinata* e a *Cynara cardunculus* têm dado os primeiros passos na produção comercial de óleo. A *Brassica carinata* é vista como uma alternativa ao sequeiro e regadio extensivo. A *Cynara cardunculus* é uma cultura plurianual e permanente, estando, contudo mais direccionada para a produção de biomassa embora sendo possível o aproveitamento das sementes para produção de óleo.



Figura 9. Pormenores de plantas de *Cynara cardunculus* (esq.) e *Brassica carinata* (dta.).

Fonte: Wikipedia

2.5.3. Óleos alimentares usados

Os óleos alimentares usados são uma das alternativas com melhores perspectivas para a produção de biodiesel. Estes ainda são a matéria prima mais barata e, com a sua utilização, são evitados os custos relacionados com tratamento destes óleos como resíduos. Portugal é um grande consumidor de óleos vegetais alimentares, nomeadamente óleos de azeitona (azeite) e de girassol. Estes óleos alimentares apresentam baixos níveis de reutilização, pelo que não sofrem grandes alterações e mostram ter boa aptidão para o aproveitamento como biodiesel.

A utilização destes óleos usados representa uma correcta e eficaz gestão e utilização de resíduos, sendo proveitosa não só a nível económico como também a nível ambiental.

Os óleos que apresentam mais vantagens em reciclar são os de fritura, para além de permitirem a produção de combustível eliminam um resíduo



contaminante como é o caso do óleo usado. A Comissão Europeia propõe mesmo a criação por parte dos diversos países membros um sistema de recolha de óleo constituído por três etapas: industrial, hotelaria e doméstica.

A utilização de óleos usados apresentam dificuldades logísticas, não só pela recolha em si, mas também pelo rastreio, controlo e segurança devido ao seu carácter de resíduo.

2.5.4. Óleo de micro-algas

A produção de óleos através de micro-algas tem-se revelado bastante promissora, com altos índices de produtividade em relação às culturas tradicionais. Estas apresentam entre outras vantagens, maior facilidade de industrialização do processo e tempos de colheita reduzidos.

O cultivo de micro-algas pode ser feito em águas salgadas, salobras ou doces, dependendo das espécies a produzir.

Para a produção de biodiesel, as micro-algas mais estudadas são: as *Platymonas sp.*, *Botryococcus braunii*, *T. suecica*, *Cyoclotella sp.* (diatomácia). *C. cryptica* e a *Chlorella protothecoides*.

O cultivo destas algas é feito em lagoas de baixa profundidade em que as algas são movimentadas através de agitadores de pás e, para aumentar a produtividade e o conteúdo relativo em ácidos gordos, é normalmente necessário adicionar CO₂.

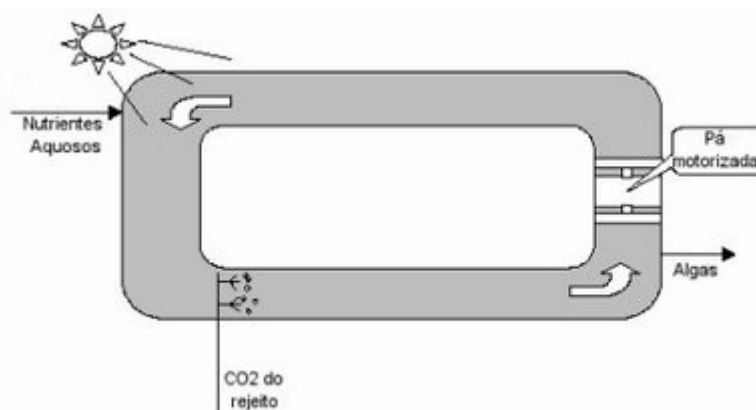


Figura 10. Esquema de processo de cultura de microalgas.

Fonte: NREL, 1998



2.6. Reacções presentes na produção de biodiesel

2.6.1. Reacções de transesterificação de triglicerídeos

Embora a esterificação seja um processo passível de ser utilizado para a obtenção de biodiesel, o método mais utilizado é a transesterificação, também conhecido como alcoólise.

Esta baseia-se na reacção de moléculas de triglicerídeos com álcoois de baixo peso molecular (metanol, etanol, propanol, butanol) para produzir ésteres e glicerina. A reacção de transesterificação, apresentada na figura 11, desenvolve-se numa proporção 3 moles de álcool para 1 mole de triglicerídeo e pode ser efectuada via etílica ou via metílica. A formação de glicerina, imiscível com os ésteres metílicos, tem um papel importante no deslocamento da reacção para o lado direito, alcançando-se conversões a rondar 100%.

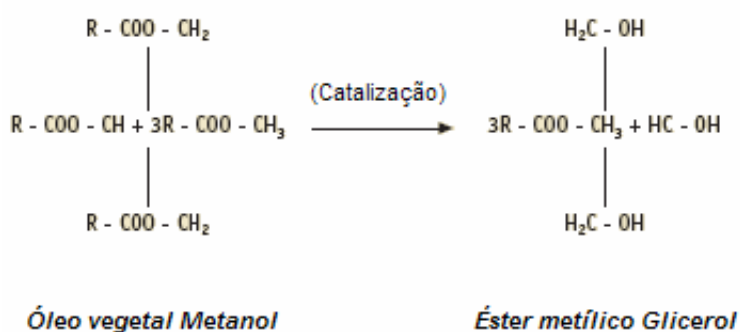


Figura 11. Reacção de transesterificação.

Na próxima figura estão representadas as diferentes reacções que têm lugar na transesterificação. Esta, quimicamente, consiste em três reacções reversíveis e consecutivas onde o triglicerídeo é sucessivamente convertido em diglicerídeo, monoglicerídeo e finalmente glicerina. Em cada uma destas reacções é libertada um mole de éster metílico.

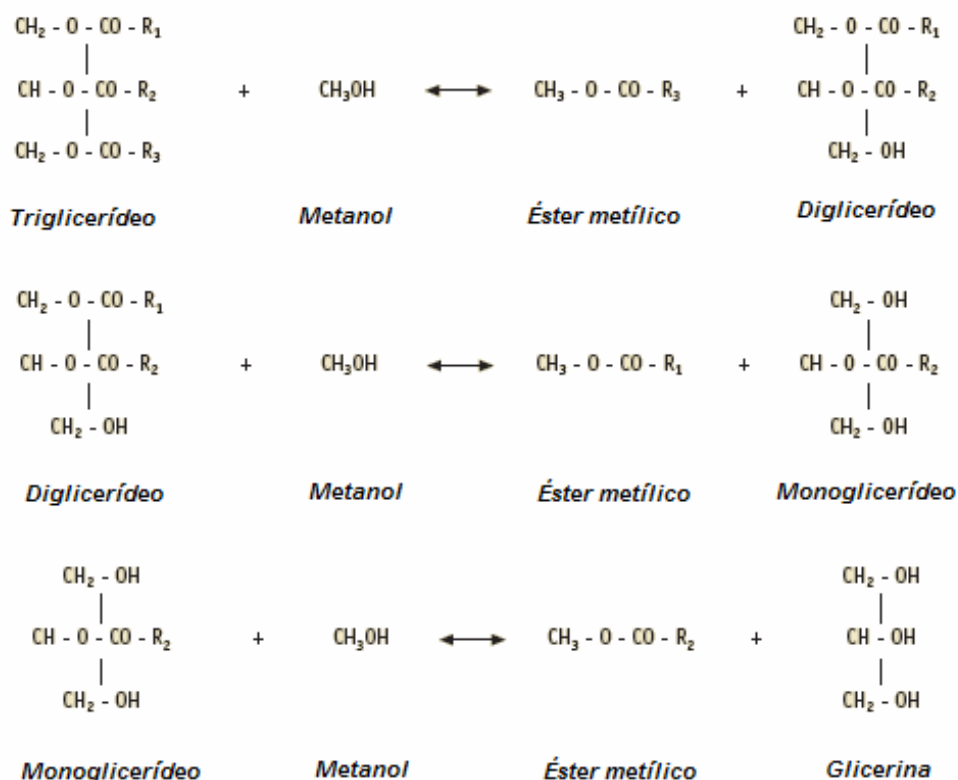


Figura 12. Reacções implicadas na transesterificação.

Na reacção de transesterificação é utilizado um catalisador com vista a aumentar a velocidade de reacção e o seu rendimento. Estes catalisadores podem ser ácidos homogéneos (H_2SO_4 , HCl , H_3PO_4 , RSO_3), ácidos heterogéneos (resinas sulfónicas, SO_4/ZrO_2 , WO_3/ZrO_2), bases heterogéneas (MgO , CAO , $\text{NaOH}/\text{Al}_2\text{O}_3$), bases homogéneas (KOH , NaOH) ou enzimáticos (Lipases, *Pseudomonas*). De todos estes catalisadores, os que são mais utilizados à escala comercial são os catalisadores básicos homogéneos, uma vez que estes actuam de forma muito mais rápida e em condições muito mais moderadas.

Numa reacção de transesterificação, quando se utiliza um catalisador ácido são necessárias temperaturas muito elevadas e tempos de reacção mais prolongados, sendo por esse mesmo motivo também bastante utilizados.

No entanto, a utilização de bases, como já foi referido é a opção mais utilizada à escala industrial. Isto implica que os glicerídeos e o álcool devam ser anidros (<0,06% v/v) de forma a evitar a ocorrência de saponificação, que não é mais que a reacção do ácido gordo com o catalizador alcalino. Além disso, os triglicerídeos devem ter uma baixa proporção de ácidos gordos livres para evitar a sua neutralização com o catalizador e sejam formado sabão.

As reacções secundárias que podem ocorrer na transesterificação podem então ser duas: a reacção de saponificação e a reacção de neutralização de ácidos gordos livres.



O triglicerídeo reage com o catalizador básico na presença de água, dando lugar à formação de sabões (reacção de saponificação), este facto pode ser observado na seguinte figura.

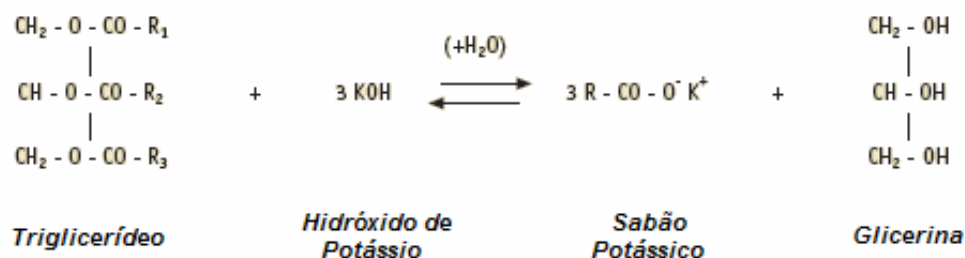


Figura 13. Reacção de saponificação.

A saponificação é favorecida quando se utiliza hidróxido de potássio ou sódio uma vez que as suas moléculas contêm grupos OH responsáveis por esta reacção. Quando se utilizam estes catalisadores deve-se ter especial cuidado com as condições de reacção, especialmente em relação à temperatura e à quantidade de catalisador de forma a reduzir ao máximo a saponificação. No caso dos metóxidos a produção de sabão é quase nula uma vez que estes catalisadores apenas contêm o grupo OH como impureza. Em qualquer caso devem ser utilizados óleos e alcoóis essencialmente anidros, visto que a água favorece a formação de sabão por saponificação.

A fim de evitar reacções secundárias de saponificação, devem-se submeter os óleos com elevados teores de humidade a processos de evaporação antes de ser levada a cabo a reacção de transesterificação.

Por outro lado, existem duas formas de eliminar os ácidos gordos livres presentes nos óleos. Uma forma consiste em proceder à sua neutralização, já que os ácidos gordos presentes no óleo vegetal reagem com o catalisador básico (principalmente NaOH) na presença de água e formam sabão (figura 13). Outra forma de eliminar os ácidos gordos livres consiste numa reacção de esterificação com um catalizador ácido levando à formação de éster metílico.

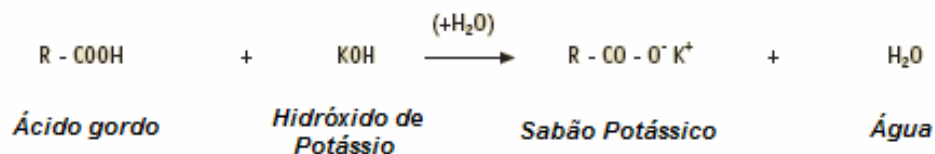


Figura 14. Reacção de neutralização de ácidos gordos livres.



2.6.2. Reacções de esterificação de ácidos gordos

O processo utilizado na produção de biodiesel é a transesterificação, no entanto, a esterificação tem vindo a ser combinada com a transesterificação. Esta revela-se uma forma aproveitar de forma eficiente o subproduto de ácidos gordos para produção de biodiesel.

O método mais comum de aproveitamento de ácidos gordos consiste no aquecimento de uma mistura de álcool e o ácido gordo correspondente com ácido sulfúrico, utilizando o reagente mais económico em excesso de forma a aumentar o rendimento da reacção (esterificação de Fischer). O ácido sulfúrico desempenha neste caso tanto o papel tanto de catalizador como de substância higroscópica que absorve a água formada na reacção.

A prática deste procedimento comporta vários inconvenientes. O álcool pode sofrer reacções de eliminação formando olefinas, formação de éter ou o ácido gordo pode sofrer descarboxilação.

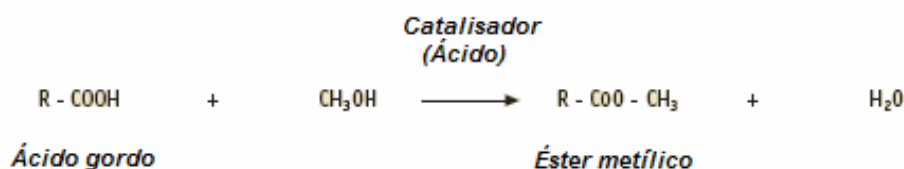


Figura 15. Reacção de esterificação.

Os catalisadores utilizados neste tipo de reacção, ao contrário do que acontece no processo de transesterificação onde habitualmente são hidróxidos, são ácidos ou enzimáticos. No caso da esterificação, ao contrário da reacção de transesterificação, ao se utilizar catalisadores ácidos não é necessário recorrer a temperaturas elevadas e longos tempos de reacção.

2.6.3. Catalisadores

Como foi anteriormente referido, é necessário recorrer a catalisadores para que seja ocorra a reacção de transesterificação (ou esterificação) e que esta seja possível de um ponto de vista cinético.

No caso da transesterificação, estes catalisadores podem ser ácidos homogéneos, ácidos heterogéneos, bases homogéneas ou enzimáticos. A nível industrial os catalisadores básicos são os que se utilizam por permitirem uma reacção mais rápida e operam com temperaturas mais moderadas. O único inconveniente destes catalisadores prende-se ao facto da necessidade de estes serem anidros de forma a evitar reacções secundárias, como a saponificação, que reduzem o rendimento do processo. Põe outro lado, os triglicerídeos devem ter uma baixa proporção de ácidos gordos livres para evitar que estes se neutralizem com o catalizador e formem também sabões.



Na figura seguinte encontram-se resumidas as vantagens e desvantagens associadas à utilização dos diferentes tipos de catalisadores na reacção de transesterificação.

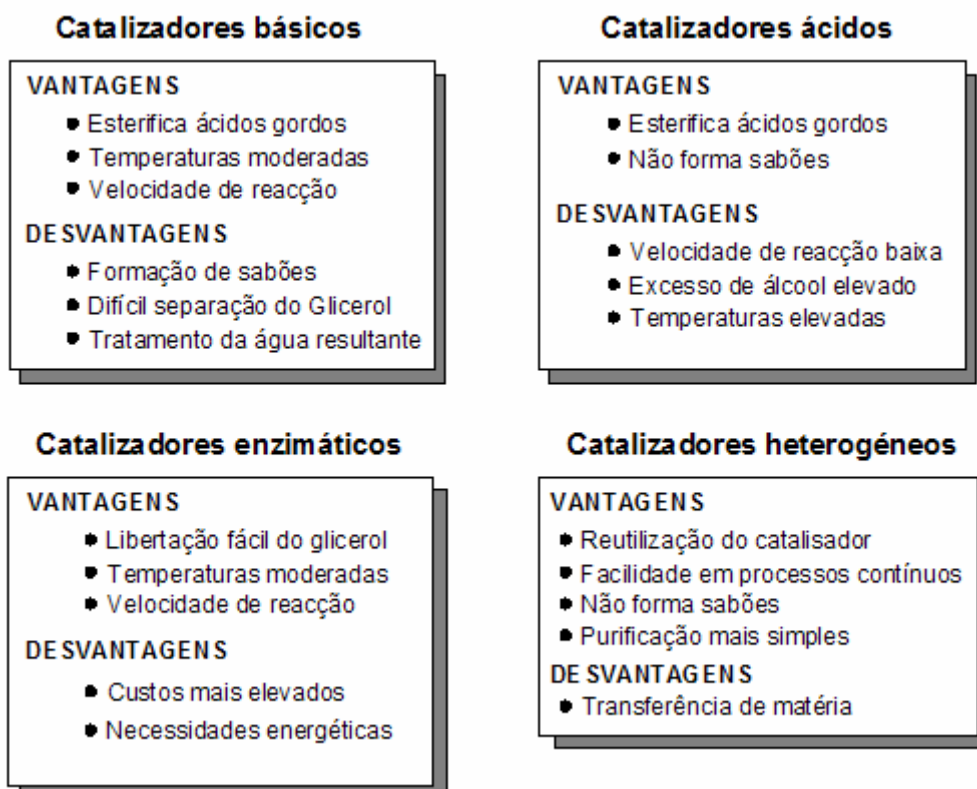


Figura 16. Vantagens e desvantagens dos catalisadores utilizados na transesterificação.

2.6.4. Variáveis da reacção de transesterificação

Entre as variáveis mais importantes que afectam de forma decisiva a reacção de transesterificação, destacam-se as seguintes:

Acidez e humidade

Os conteúdos de ácidos gordos e de humidade são parâmetros determinantes no que concerne à viabilidade do processo de transesterificação do óleo vegetal. Para que se realize a reacção completa é necessário um valor de ácidos gordos livres (FFA – *free fatty acid*) menor que 3% (Camús J., Laborda J., 2006). Quanto mais alta for acidez do óleo menor é o grau de conversão em éster metílico. Além disso, tanto o excesso ou deficiência de catalisador podem levar à produção de sabão.

A presença de humidade também é um factor determinante, uma vez que a água reage com os catalisadores formando sabão diminuindo assim o rendimento da reacção de transesterificação.



As matérias primas usadas como base para o processo de álcoolise devem cumprir certas especificações. Os triglicerídeos devem ter um valor ácido baixo e os materiais devem ter conteúdos baixos de humidade. A adição de catalisadores de hidróxido de sódio compensa a elevada acidez embora o sabão resultante provoque um aumento de viscosidade e de formação de gel que interfere na reacção e na separação do glicerol. Quando não se verificam estas condições, os rendimentos da reacção reduzem-se substancialmente. O hidróxido e metóxido de sódio ou de potássio devem manter um grau de humidade baixo. O seu contacto com o ar diminui a efectividade do catalisador devido à sua interacção com o dióxido de carbono e a humidade.

Actualmente, a maior parte do biodiesel produzido, provem de óleos vegetais aos quais se adiciona metanol e um catalisador básico. No entanto, muitos óleos de baixo custo e gorduras animais podem ser utilizados. O seu problema reside na sua grande quantidade de ácidos gordos que não se podem converter em biodiesel quando são utilizados catalisadores básicos. Nestes casos é necessário proceder à esterificação por fases: inicialmente deve realizar-se um pré-tratamento para converter os FFA em ésteres metílicos com um catalisador ácido e numa segunda fase é realizada a transesterificação com um catalisador básico para completar a reacção.

Tipo de catalisador e concentração

Os catalisadores utilizados para a transesterificação podem ser classificados em básicos, ácidos, enzimáticos ou catalisadores heterogéneos, sendo os básicos, e, em particular os hidróxidos os mais utilizados.

Se o óleo usado tiver um elevado grau de ácidos gordos e elevada humidade os catalisadores ácidos são os mais adequados. Estes ácidos podem ser sulfúrico, fosfórico ou ácido sulfónico orgânico.

Independentemente do processo de transesterificação, com catalisadores básicos, a transformação dos triglicerídeos nos seus ésteres metílicos correspondentes ocorre com maiores taxas de conversão e em períodos de tempo muito mais curtos. No entanto, a utilização de catalisadores pode acarretar alguns inconvenientes: o catalisador deve ser separado do produto final, dificuldade de recuperação do glicerol e a água resultante do processo deve ser tratada.

Os catalisadores enzimáticos permitem obter resultados interessantes tanto em sistemas aquosos como não aquosos, o que pode resolver alguns dos problemas anteriores. Em particular o glicerol pode ser facilmente separado e os ácidos gordos são completamente convertidos em ésteres alquílicos. No entanto, a utilização destes catalisadores em detrimento dos catalisadores básicos implica um aumento de custos.



Relação molar entre álcool e óleo e tipo de álcool

Uma das variáveis mais importantes que afectam o rendimento da reacção de transesterificação é a relação molar existente entre o álcool e os triglicerídeos do óleo. A estequiometria da reacção requer três moles de álcool para uma mol de triglicerídeo produzindo três moles de éster e uma mol de glicerol.

A transesterificação é uma reacção de equilíbrio que necessita de um excesso de álcool de forma a maximizar o rendimento. Para se obter uma conversão máxima pode ser utilizada uma razão molar de 6:1. põe outro lado, um valor elevado de relação molar de álcool afecta de forma negativa a separação da glicerina, visto que a sua solubilidade é aumentada. A não separação da glicerina da solução provoca a reversão da reacção diminuindo assim o rendimento de formação de ésteres.

Comparativamente com a formação de éster metílico, a formação de éster etílico é mais complicada, muito devido à dificuldade de obtenção de uma emulsão estável durante a etanólise. Tanto o etanol como o metanol não se dissolvem com os triglicerídeos à temperatura ambiente e a mistura deve ser agitada mecanicamente de forma a haver transferência de massa. Durante a reacção é formada uma emulsão, na metanólise esta descende rapidamente formando-se uma fina camada de glicerol sobre uma zona rica em éster metílico. No caso da etanólise esta emulsão não é suficientemente estável o que dificulta bastante a separação e purificação do éster etílico. Estas emulsões são causadas pela formação de monoglicerídeos e diglicerídeos intermédios que contêm tanto grupos hidróxidos (OH) polares como cadeias de hidrocarbonetos não polares.

Efeito do tempo de reacção e temperatura

Os níveis de conversão registados durante a reacção aumentam com o tempo. Assim, tomando como exemplo a transesterificação de óleos vegetais como colza, girassol ou soja com uma relação molar de 6:1 de metanol e com um catalisador de metóxido de sódio a 0,5% e a 60°C. Após 1 minuto de reacção observam-se rendimentos na ordem dos 80%, já depois de uma hora a taxa de conversão da mesma reacção já ronda os 93%.

A reacção de transesterificação pode ocorrer a diferentes temperaturas dependendo do óleo a transformar. No caso de óleo refinado com metanol (6:1) a 1% NaOH a temperaturas de 60, 45 e 32°C e após 6 minutos de reacção observam-se rendimentos de 94, 87 e 64% respectivamente.



2.7. Processos da produção industrial de biodiesel

Como foi referido no segmento anterior, o processo químico de transesterificação é composto por três reacções reversíveis e consecutivas. O tríglicerídeo é convertido consecutivamente em diglicerídeo, monoglicerídeo e, finalmente glicerina. Em cada reacção é libertado um mol de éster metílico. Todo este processo é levado a cabo num reactor onde ocorrem as referidas reacções químicas e as posteriores fases de separação, purificação e estabilização.

Serão de seguida descritos os diferentes processos patentados na produção industrial de biodiesel, entre os quais, o processo geral de transesterificação e o processo geral de esterificação. Este último é habitualmente utilizado em combinação com a transesterificação para tratar dos ácidos gordos, subprodutos da transesterificação. Serão ainda abordadas as variações destes processos em contínuo, descontínuo e em condições supercríticas nas quais não é necessária a adição de catalisadores.

2.7.1. Processo geral de transesterificação

Embora todas tenham em comum os aspectos mencionados anteriormente para a produção de biodiesel mediante o processo de transesterificação, existem múltiplas opções de operação viáveis para a produção industrial. Muitas destas tecnologias podem ser combinadas de diferentes formas variando as condições do processo e a alimentação do mesmo. A escolha da tecnologia deverá ser efectuada de acordo com o volume de produção desejado, a alimentação, a qualidade e a recuperação de álcool e catalisador.

De forma geral, instalações de menor capacidade e de diferentes qualidade de alimentação utilizam processos Batch ou descontínuos. Os processos contínuos são mais comuns em instalações de grande capacidade em que se justifique maior número de pessoal e necessitem de uma alimentação mais uniforme.

Processo descontínuo

Este é o método mais simples para a produção de biodiesel, operando geralmente com relações molares de 4:1 (álcool:triglicerídeo) e com agitação mecânica.

As temperaturas de operação mais habituais neste processo rondam os 65°C, embora sejam possíveis temperaturas entre 25 e 85°C.

O catalisador mais comum é o hidróxido de sódio (NaOH) embora também seja bastante utilizado o hidróxido de potássio (KOH) em



concentrações de 0,3 a 1,5%, dependendo se é utilizado KOH ou NaOH. É necessária uma agitação rápida para se obter uma mistura correcta de óleo, catalisador e álcool. Perto do final da reacção a agitação deve ser menor de forma permitir a separação do glicerol do éster. Na transesterificação, como foi registado anteriormente, quando se utilizam catalisadores ácidos são necessárias temperaturas elevadas e longos tempos de reacção.

Algumas instalações operando em descontínuo, para se aumentar o rendimento geral do processo, utilizam reacções em duas etapas, havendo eliminação de glicerol entre elas. Outra forma de aumentar o rendimento do processo de produção de biodiesel consiste na utilização de temperaturas mais elevadas e razões entre álcool e óleo maiores. Quanto ao tempo de reacção, este deve estar compreendido entre 20 minutos e uma hora.

Na próxima figura pode ser observado um diagrama de blocos de um processo de transesterificação em descontínuo.

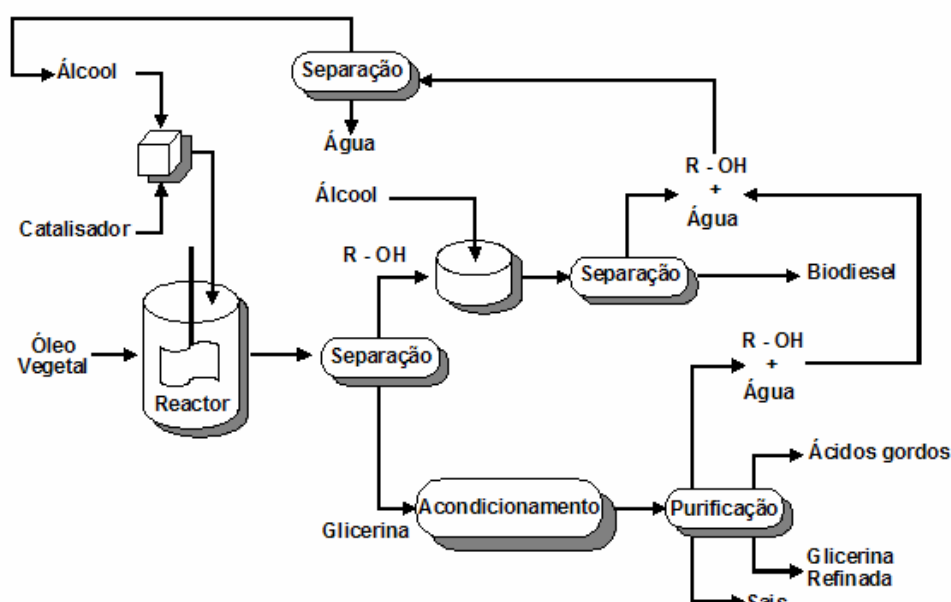


Figura 17. Processo de transesterificação em descontínuo.

Fonte: www.miliarium.com

Processo contínuo

A transesterificação em processo contínuo é levada a cabo em tanques agitados denominados CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactor*). Este tipo de reactores pode variar bastante em termos de tamanho de forma a aumentar os tempos de residência bem como para aumentar os resultados da reacção. Após uma primeira fase de reacção, é efectuada a decantação (separação) do glicerol e, depois de concluída, é prosseguida a reacção num segundo reactor CSTR na qual se conseguem obter percentagens de conversão na ordem dos 98%.



Um elemento essencial a ter em conta no design de reactores CSTR é assegurar que a mistura de óleo, álcool e catalisador se realiza convenientemente de forma que a sua composição no reactor seja praticamente constante. Desta forma é aumentada a dispersão do glicerol no éster o que leva a que o tempo exigido para a separação de fases aumente.

Existem diversos processos que utilizam uma mistura intensa para favorecer a reacção de esterificação. Os reactores utilizados nestes casos costumam ser do tipo tubular. Nestes reactores a mistura move-se longitudinalmente com menor quantidade na direcção axial. Este tipo de reactor é denominado por *Plug Flow Reactor* (PFR), este basicamente funciona de forma semelhante a vários pequenos reactores CSTR em série.

O resultado da utilização destes reactores é um sistema em contínuo que requer menores tempos de residência (na ordem de 6 a 10 minutos), operando com altas temperaturas e pressões e rendimentos de conversão elevados.

Na figura seguinte é apresentado o diagrama de blocos de um processo de transesterificação em reactores PFR.

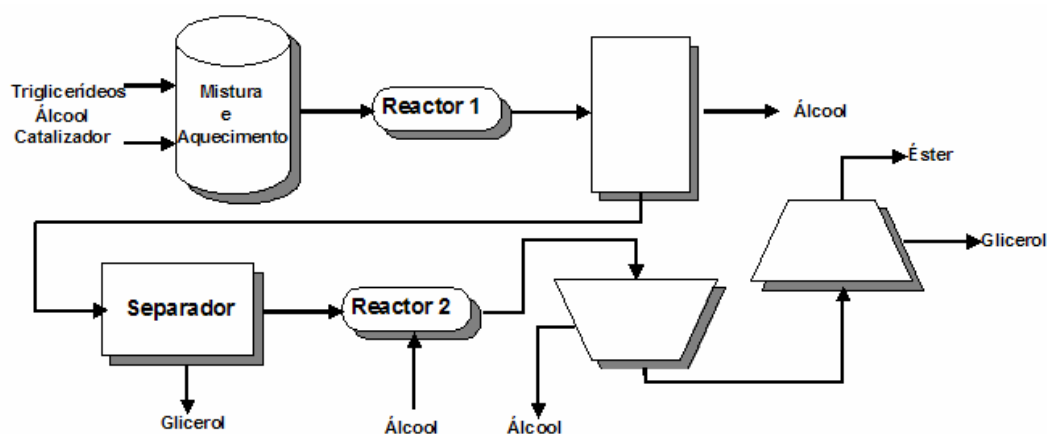


Figura 18. Processo de transesterificação em contínuo.

Fonte: www.miliarium.com

Na catálise heterogénea, os catalisadores básicos são desactivados facilmente devido à presença de ácidos gordos livres (FFA) e de água que favorece a formação dos mesmos. Em casos de óleos com algum grau de acidez é preferível a esterificação dos ácidos gordos livres com catalisadores ácidos que apresentam elevadas velocidades de reacção. Estes necessitam no entanto de dois reactores com uma fase intermédia de eliminação de água. Deste modo, alimentações com até 30% de FFA podem ser esterificados com etanol, reduzindo-se a presença de ácidos gordos livres até 1%. Esta etapa prévia de esterificação pode ser levada a cabo com álcoois superiores ou glicerina que acaba por ser uma alternativa bastante atractiva uma vez que é um subproduto do processo de produção de biodiesel.



2.7.1. Processo de esterificação

O método mais comum consiste no aquecimento de uma mistura de óleo, álcool e o ácido correspondente. Nos processos de esterificação apenas se utilizam catalisadores ácidos como ácido sulfúrico, utilizando o reagente mais económico em excesso de forma a aumentar o rendimento da reacção (esterificação de Fischer). O ácido sulfúrico serve, neste caso, tanto como catalisador, como de substância higroscópica que absorve a água formada na reacção. Por vezes, o ácido sulfúrico é substituído por ácido fosfórico concentrado.

A prática deste procedimento apresenta no entanto vários inconvenientes. O álcool pode sofrer reacções de eliminação formando olefinas, esterificação com o próprio ácido sulfúrico ou descarboxilação do ácido orgânico.

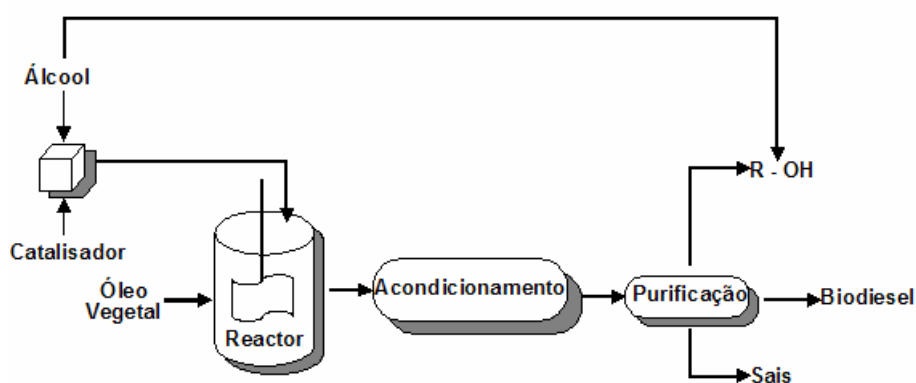


Figura 19. Processo de esterificação.

Fonte: www.miliarium.com

2.7.2. Processo combinado de esterificação–transesterificação

Este tipo de processos refina os ácidos gordos separadamente do sistema de alimentação ou mediante um tratamento diferenciado da unidade de esterificação. Adicionam-se catalisadores cáusticos e o produto da reacção é separado por centrifugação, este processo é denominado por *Caustic Stripping*.

Os óleos refinados são secados e enviados para a unidade de transesterificação. Desta maneira, os ácidos gordos podem ser transformados em ésteres metílicos mediante um processo ácido de esterificação.

Os processos de catálise ácida podem ser usados para a esterificação directa dos ácidos gordos livres (FFA). Uma alternativa a este processo consiste em utilizar um catalisador básico para formar deliberadamente sabão com os FFA. O sabão é posteriormente recuperado, o óleo é secado e posteriormente utilizado num sistema convencional com catalisadores básicos.



Na figura apresentada seguidamente pode ser observado o diagrama do processo combinado de esterificação-transesterificação.

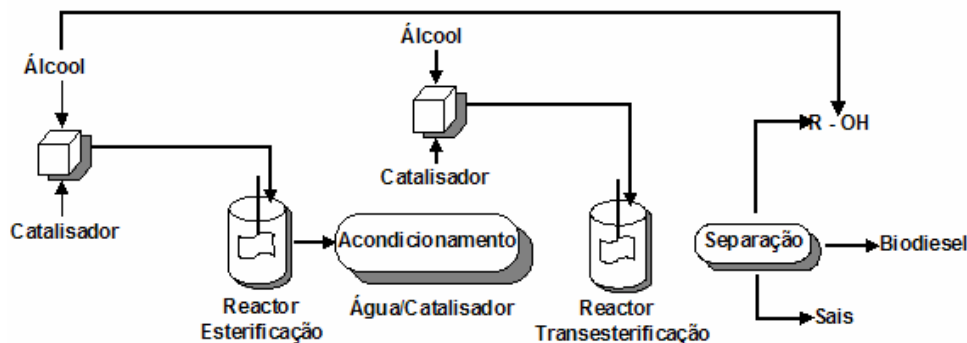


Figura 20. Processo combinado esterificação - transesterificação.

Fonte: www.miliarium.com

Na reacção de esterificação – transesterificação podem ser aproveitados os ácidos gordos subprodutos da reacção de transesterificação representada na figura 17 para alimentar o reactor de esterificação.

2.7.3. Processo em condições super-críticas

Quando um fluido é submetido a temperaturas e pressões que excedem o seu ponto crítico, aparecem uma série de propriedades incomuns. Deixa de ser observada uma diferença entre a fase líquida e vapor, existindo apenas uma fase. Ainda, os dissolventes que contêm grupos OH, como a água ou álcoois primários, tomam as propriedades de superácidos.

Um exemplo de sistema sem catalisadores é um que utiliza uma elevada razão molar álcool:óleo (42:1). Operando com condições supercríticas (350 a 400°C e $P > 80$ atm) a reacção é completa ao fim de apenas alguns minutos. Os custos de instalação e operação associados são mais elevados assim como é consumida mais energia. Apesar dos custos serem maiores, os resultados obtidos nestas condições têm-se revelado bastante interessantes.

Na próxima figura é representado o diagrama de funcionamento de um processo em que é utilizado um reactor supercrítico, sem necessidade de utilização de catalisadores.

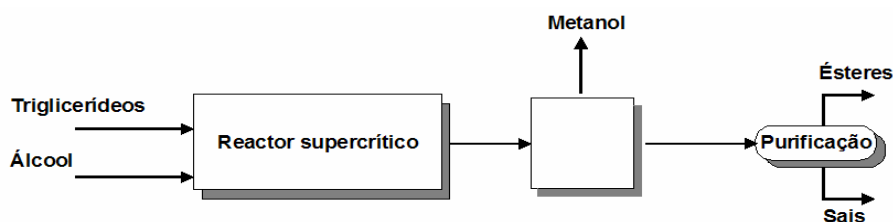


Figura 21. Processo de produção de biodiesel mediante processo supercrítico.

Fonte: NREL



2.8. Produção de biodiesel em Portugal

Em Portugal, a dependência energética do sector transportador relativamente ao petróleo é bastante acentuada, sendo responsável por 42 % (IEA, 2005) do consumo da totalidade do petróleo importado.

A substituição de mais de 300 milhões de litros de combustíveis até 2010 (DGGE, 2006) que corresponde a uma incorporação de dez por cento nos combustíveis rodoviários, antecipando em dez anos o objectivo da UE, potencia a criação de unidades industriais e o desenvolvimento da agricultura energética.

O Governo fixou em 205 mil toneladas a quantidade de bio combustíveis a isentar de ISP (Imposto sobre os Produtos Petrolíferos) em 2007. Destas, 4.973 toneladas têm origem em produção agrícola nacional. No entanto, esse valor deve subir para 405 mil toneladas até 2010 atendendo ao aumento previsto para a percentagem de incorporação (Ministério da Economia e da Inovação, 2007).

As medidas de isenção fiscal (ISP) visam fomentar a utilização dos biocombustíveis nos transportes para reduzir a dependência energética portuguesa e dar cumprimento à directiva comunitária que estabelece, até 2020, a substituição de 10 por cento dos combustíveis convencionais usados nos transportes por combustíveis alternativos. Os pequenos produtores dedicados beneficiarão de isenção total de ISP até ao limite máximo global de 40 mil toneladas/ano (Ministério das Finanças e da Administração Pública, 2007).

As empresas produtoras de biodiesel em Portugal são enumeradas na seguinte lista:

- Iberol
- Biovegetal
- Martifer
- Mota-Engil
- Sunenergy
- Tecnia
- Torrejana
- Valouro
- Space
- Tagol



Fábrica de biodiesel da Iberol

A Iberol – Sociedade Ibérica de Oliaginosas S.A., situada em Alhandra, no concelho de Vila Franca de Xira, possui duas unidades de produção de biodiesel. A matéria-prima utilizada provém principalmente de óleos vegetais virgens extraídos do girassol, palma, soja e colza.

Também os óleos alimentares usados resultantes da fritura de alimentos podem ser valorizados como matéria-prima para a produção de biodiesel evitando-se o seu lançamento na rede de saneamento básico. A promoção da actividade comercial de recolha e venda deste resíduo constitui uma oportunidade de negócio, com receitas interessantes para as autarquias ou agentes económicos.



Figura 22. Fábrica de biodiesel da Iberol.

Fonte: www.min-economia.pt

O laboratório da fábrica de biodiesel realiza o controlo de qualidade da matéria-prima e dos produtos fabricados de modo a garantir o cumprimento das normas EN14224 e da *British Standard*, BS 2621. a produção é contínua e a labora 24 horas por dia, entregando o total da produção à indústria refinadora para posterior incorporação nos combustíveis rodoviários.

Nas tabelas seguintes podem ser observados dados relativos a consumos energéticos e características construtivas da fábrica.

Energia	Consumo/h
Vapor (12 bar)	4400 kg/h
Electricidade	420 kWh
Ar comprimido (7 bar)	150 Nm ³ /h

Tabela 8. Dados de consumo energético na produção de biodiesel.

Fonte: www.min-economia.pt



Capacidade instalada	120000 t/ano
Tecnologia	Transesterificação de ácidos gordos
Matéria-prima	Óleos de colza, soja, girassol, palma e óleos de fritura usados
Produção	100000 t/ano
Investimento	58 M€
Início de actividade	2006
Novos postos de trabalho	85

Tabela 9. Características técnicas da fábrica da Iberol.

Fonte: www.min-economia.pt

Fábrica de Biodiesel da Prio Biocombustíveis

A Prio Biocombustíveis S.A., uma empresa do Grupo Martifer, iniciou a produção de biodiesel em Portugal numa fábrica localizada no terminal de granéis líquidos do porto de Aveiro, na Gafanha da Nazaré.



Figura 23. Fábrica de biodiesel da Prio Biocombustíveis em Aveiro.

Fonte: www.min-economia.pt

Dedicada a transformação de oleaginosas, tem actualmente uma capacidade de produção de 100.000 t/ano (APA, 2006) e utiliza como matérias-primas principais a colza e o girassol.



Seguidamente, podem ser observados dados relativos a consumos e características construtivas da fábrica.

Energia	Consumo/h
Vapor (12 bar)	4500 kg/h
Electricidade	300 kWh
Ar comprimido (7 bar)	70 Nm ² /h

Tabela 10. Dados de consumo energético na produção de biodiesel.

Fonte: www.min-economia.pt

Capacidade instalada	100000 t/ano
Tecnologia	LURGI
Matéria-prima	Óleos de colza, girassol e palma
Produção	100000 t/ano
Investimento	30 M€
Início de actividade	2007
Novos postos de trabalho	30

Tabela 11. Características técnicas da fábrica da Prio Biocombustíveis.

Fonte: www.min-economia.pt



Capítulo 3. Análise de ciclo de vida

Uma Análise de Ciclo de Vida (ACV) é um levantamento de todas as entradas, saídas e de todos os potenciais impactos ambientais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida. O termo “ciclo de vida” refere-se a todos os processos que ocorrem no decurso da vida do produto desde a sua fabricação (incluindo aquisição de matéria prima), utilização, manutenção e finalmente a sua deposição final (Ferreira J., 2004). Na figura seguinte são apresentados as principais fases de um ciclo de vida que podem ser consideradas numa ACV, assim como as entradas e saídas a medir.



Figura 24. Estágios do ciclo de vida de um produto.

Fonte: USEPA, 2001

No estudo de ACV de um produto ou serviço, todas as extracções para o ambiente são determinadas, quando possível, numa forma quantitativa ao longo de todo o ciclo de vida, desde que a produção até à decomposição (*from cradle to grave*), sendo com base nestes dados que são avaliados os potenciais impactos nos recursos naturais, no ambiente e na saúde humana (Ferreira J., 2004).

O processo de ACV é uma sistemática abordagem faseada composta por quatro componentes básicas (ISSO 14040, 1997):

- **Definição de objectivos e âmbito** – Nesta fase é feita uma descrição do produto, processo ou actividade em estudo. É estabelecido o contexto no qual é inserido o estudo e são identificados os limites e efeitos ambientais a serem revistos para a avaliação.
- **Análises de inventário** – Nesta fase são quantificadas as quantidades de energia, água e materiais utilizados. Igualmente nesta fase são quantificadas as descargas para o ambiente, tais



como, emissões para a atmosfera, deposição de resíduos sólidos ou descargas de efluentes líquidos.

- **Análise de impacto** – Nesta fase são analisados os efeitos humanos e ecológicos da utilização de energia, água e materiais, assim como das descargas identificadas na análise de inventário.
- **Interpretação dos resultados** – Avalia os resultados da análise de inventário e análise de impacto para seleccionar o produto, processo ou serviço com uma compreensão clara das incertezas e suposições utilizadas para gerar os resultados.

Na figura seguinte é apresentado um diagrama das fases referidas acima, da forma como se encontram interligadas e ainda as possíveis aplicações das ACV.

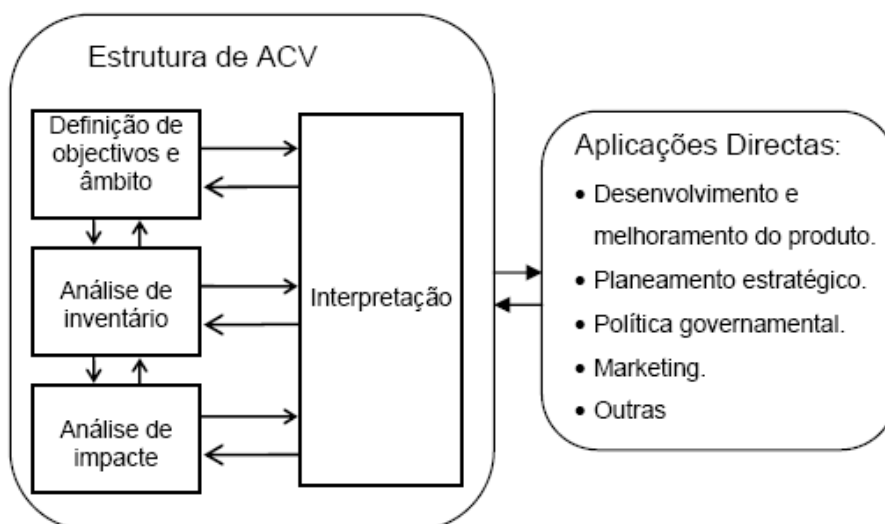


Figura 25. Fases de uma ACV.

Fonte: ISO 14040, 1997

A metodologia ACV tem inúmeras aplicações, desde o desenvolvimento de produtos, passando pela rotulagem ecológica e regulação, até à definição de cenários de prioridade e de política ambiental.

3.1. Benefícios de um estudo ACV

Os dados de um estudo ACV em conjunto com dados de análises custos e desempenho, podem ajudar os responsáveis pela tomada de decisão na selecção de produtos ou processos que resultem em menores impactos para o ambiente.

A metodologia ACV permite identificar a transferência de impactos ambientais de um meio para outro (a eliminação de emissões gasosas pode



ser conseguida à custa do aumento das emissões de efluentes líquidos) ou de fases do ciclo de vida para outras.

Ao comparar dois produtos concorrentes pode parecer que o produto A é melhor para o ambiente por necessitar de menos matérias primas na fase de produção que o produto B. No entanto, como na elaboração do estudo ACV são considerados todos as fases do ciclo de vida, os resultados finais podem mostrar que o produto A causa maior impacto no ambiente, fruto de um maior consumo de electricidade na fase de utilização. Sem a elaboração de um estudo ACV, factos como os referidos anteriormente não são detectados (Ferreira J., 2004).

A elaboração de estudos ACV permitem aos pesquisadores e entidades responsáveis (USEPA, 2001):

- Desenvolver uma sistemática avaliação das consequências ambientais associadas com um dado produto.
- Analisar os balanços ambientais associados com um ou mais produtos ou processos específicos de modo a que os visados (estado, comunidade, etc.) aceitem uma acção planeada.
- Quantificar as emissões ambientais para o ar, água, e solo relativamente a cada fase ou processo do ciclo de vida do produto.
- Assistir na identificação de significantes trocas de impactos ambientais entre fases de ciclo de vida e o meio ambiental.
- Avaliar os efeitos humanos e ecológicos do consumo de materiais e descargas ambientais para a comunidade local, região e o mundo.
- Comparar os impactos ecológicos e na saúde humana entre dois ou mais produtos/processos concorrentes ou identificar os impactos de um produto ou processo específico.
- Identificar impactos numa ou mais áreas ambientais específicas de interesse.



3.2. Limitações de um estudo ACV

A execução de um estudo ACV envolve normalmente diversos recursos e revela-se ser uma tarefa demorada implicando o emprego de muito tempo para a sua realização (Ferreira J., 2004). Deste modo, é fundamental um bom planeamento das operações e os recursos financeiros deverão ser balanceados com os benefícios previsíveis do estudo.

O estudo ACV não determina quais os produtos ou processos têm melhores funcionamentos ou envolvem mais custos apenas permitem ter a noção dos impactos que estes têm no meio ambiente. Por isso, a informação desenvolvida num estudo ACV deve ser utilizada como uma componente de um processo de decisão que conta com outras componentes, como sejam, o custo e o desempenho (USEPA, 2001).



Capítulo 4. Metodologia

Neste capítulo será descrita a metodologia empregue na execução do trabalho apresentado. Em primeiro lugar será apresentado o plano de trabalho onde serão descritas as fases que levaram à conclusão do presente trabalho. Na segunda secção do capítulo será apresentado o modelo numérico de análise de ciclo de vida GREET que serviu como base para a elaboração do trabalho proposto.

4.1. Plano de trabalho

A primeira fase da realização deste trabalho centrou-se na revisão bibliográfica dos conceitos teóricos subjacentes à realização do trabalho proposto. Nesta fase foram pesquisados vários documentos técnicos relativos a biocombustíveis, técnicas de análise de ciclo de vida de produtos e modelos numéricos de análise de ciclo de vida de combustíveis. Relativamente aos biocombustíveis, a pesquisa centrou-se em primeiro lugar na sua implementação a nível mundial e sua aplicação no sector dos transportes. Seguidamente a pesquisa focou-se no caso específico do biodiesel nomeadamente nas suas propriedades físico-químicas, sua composição, constituintes básicos, reacções e processos associados à sua produção. Por último foi abordada a produção de biodiesel em Portugal, as metas de produção e implementação a atingir e as principais empresas e fábricas a operar.

Numa segunda fase foi feito o levantamento de informação relativa ao ciclo de vida do biodiesel aplicado a Portugal. Nesta fase foram visados os principais processos envolvidos em todas as etapas de produção, transporte e utilização do biodiesel. Para além da produção directa do biodiesel foram abrangidos os processos de produção dos combustíveis fósseis, energia eléctrica e químicos agrícolas que são directa ou indirectamente associados à produção de biodiesel. No campo dos transportes, foram recolhidos dados relativos a factores de emissão e consumo dos vários meios de transporte implicados no ciclo de vida dos combustíveis, tanto no seu transporte como consumo. Em relação a estes meios de transporte, foram considerados meios marítimos e terrestres de mercadorias no transporte de combustíveis e matérias primas, na fase de utilização dos combustíveis foram considerados apenas meios terrestres.

Depois de recolhida a informação necessária procedeu-se à actualização/alteração da base de dados do modelo GREET relacionada com biodiesel. A actualização do GREET levou à criação de um novo modelo baptizado de MACVC – Modelo de Análise de Ciclo de Vida de Combustíveis. Este modelo é centrado na análise de ciclo do biodiesel aplicado à realidade portuguesa. Através deste modelo é possível efectuar de forma simples e rápida uma análise do ciclo de vida dos principais combustíveis utilizados em Portugal, sendo neste trabalho focada a atenção no caso do biodiesel.



Por último procedeu-se à realização de um caso prático de aplicação do modelo desenvolvido de forma a testar os resultados obtidos e serem tiradas as devidas conclusões acerca do modelo e do ciclo de vida do biodiesel. O caso de estudo é baseado na implementação de biodiesel numa frota de autocarros urbanos. Neste estudo são comparados os valores de consumos energéticos e emissões poluentes associadas às fases de produção e utilização do biodiesel com os obtidos para o gasóleo. Através da comparação dos resultados obtidos são aferidas as vantagens ou desvantagens do biodiesel tanto ao nível dos custos energéticos globais como de impactos ambientais e de saúde pública.

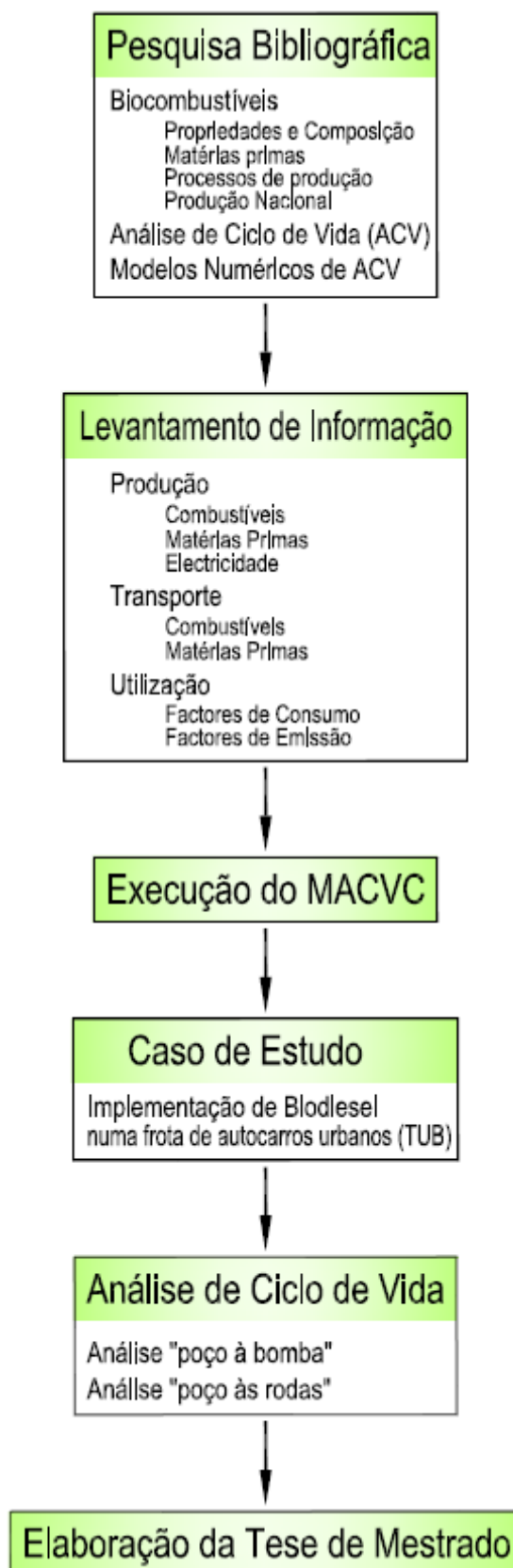


Figura 26. Fluxograma do plano de trabalho da dissertação.



Tarefas	Jan.	Feb.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Pesquisa bibliográfica												
Levantamento de informação												
Execução do MACVC												
Caso de estudo												
Análise de Ciclo de Vida												
Elaboração da Tese de Mestrado												

Figura 27. Calendarização do plano de trabalho da dissertação.

4.2. O modelo GREET

O GREET é uma ferramenta numérica de análise de ciclo de vida desenvolvida em 1995 pelo *Argonne National Laboratory*, mais precisamente pela divisão de investigação de transportes (*Center for Transportation Research*).

Este software consiste numa aplicação de Microsoft Excel, composta por 27 folhas de cálculo onde podem ser simuladas mais de 100 formas de produção de combustível e 70 tipos de combustível. Para uma determinada combinação entre tipo de veículo e combustível, o modelo permite o cálculo em separado dos seguintes parâmetros:

- Consumo total de energia (proveniente de fontes renováveis ou não-renováveis) e consumo de combustíveis fósseis, nomeadamente petróleo, carvão e gás natural.
- Emissões de gases de efeito estufa, nomeadamente dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido de azoto (N₂O).
- Emissões poluentes, tais como: compostos orgânicos voláteis (VOC), monóxido de carbono (CO), óxidos de azoto (NO_x), partículas de diâmetro inferior a 10 µm (PM10), partículas de diâmetro inferior a 2,5 µm (PM2.5) e óxidos de enxofre (SO_x).

O GREET permite a realização rápida de análises de ciclo de vida para vários cenários de utilização, de diversos sistemas veículo-combustível. Os resultados podem ser obtidos através de análises do “poço à bomba” (*well-to-pump*) ou então do “poço às rodas” (*well-to-wheels*). No primeiro caso, são apenas consideradas as fases de extracção, produção e transporte dos combustíveis até aos pontos de abastecimento. No caso de análises do “poço às rodas”, são consideradas não só as fases a montante do abastecimento como também a sua utilização através do funcionamento dos veículos que abastecem. A análise do “poço às rodas” realizada no GREET é a análise do ciclo de vida do combustível em questão, pois esta engloba todas as etapas da



“vida” dos combustíveis desde a extracção das matérias primas até à utilização do combustível nos motores dos veículos.

Seguidamente será apresentado uma breve descrição das folhas de cálculo constantes no modelo GREET:

- **Overview** – declaração de direitos de autor, descrição de conteúdos do modelo e introdução às funções presentes em cada folha.
- **Inputs** – introdução pelo utilizador os dados de partida e as suposições paramétricas para as simulações desejadas.
- **EF_TS** – realização de projecções para a evolução dos factores de emissão associados às diferentes tecnologias de combustão abrangidas pelo modelo.
- **EF** – factores de emissão associados às tecnologias de combustão contempladas pelo modelo. Esta folha está sujeita às projecções realizadas na folha anterior.
- **Fuel Specs** – características dos combustíveis e potenciais de aquecimento global de gases de efeito estufa.
- **T&D Flowcharts** – diagramas relativos ao transporte e distribuição de matérias primas e combustíveis.
- **T&D** – Cálculo de consumo de energia e emissões associadas ao transporte e distribuição de matérias primas e combustíveis.
- **Urban Shares** – cálculo de fracções urbanas das emissões totais de gases poluentes associadas às actividades contempladas na simulação.
- **Fuel Prod_TS** – projecções para as suposições paramétricas relativas aos processos de produção de combustíveis.
- **Petroleum** – cálculo de consumo de energia e emissões associadas às actividades de extracção e refinamento de petróleo bem como da produção de combustíveis seus derivados.
- **NG** – cálculo de consumo de energia e emissões associadas às actividades de extracção de gás natural.
- **Hydrogen** – cálculo de consumo de energia e emissões associadas à produção de hidrogénio como combustível automóvel.
- **Ag Inputs** – cálculo de consumo de energia e emissões associadas à produção agrícola e suas matérias primas, tais como fertilizantes, herbicidas e insecticidas.



- **EtOH** – cálculo de consumo de energia e emissões associadas à produção de etanol através de milho e biomassa celulósica.
- **E-D_Additives** – cálculo de consumo de energia e missões associadas à aditivação de gasóleo com etanol.
- **BD** – cálculo de consumo de energia e emissões associadas à produção de biodiesel de soja.
- **Coal** – cálculo de consumo de energia e emissões associadas às actividades de extracção e preparação de carvão.
- **Uranium** – cálculo de consumo de energia e emissões associadas às actividades de extracção de urânio e produção de combustível radioactivo.
- **LF_Gas** – cálculo de consumo e emissões associadas ao aproveitamento de gás metano proveniente de aterros.
- **Electric** – cálculo de consumo e emissões associadas à produção de energia eléctrica.
- **Car_LDT1_TS** – projecções para a economia de combustível e redução de emissões associadas ao funcionamento de veículos ligeiros de passageiros e mercadorias 1.
- **Car_LDT2_TS** – projecções para a economia de combustível e redução de emissões associadas ao funcionamento de veículos ligeiros de mercadorias 2.
- **Vehicles** – cálculo de consumo de energia e emissões associadas ao funcionamento dos veículos.
- **Results** – resultados da simulação realizada através de análises de “poço à bomba” e “poço às rodas” para diversas combinações de veículos e combustíveis.
- **Graphs** – representações gráficas dos resultados obtidos na folha *Results*.
- **Dist_Specs** – especificações detalhadas dos parâmetros de entrada com funções de distribuição.
- **Forecast_Specs** – informação detalhada relativa às previsões para o desenvolvimento da simulação estocástica.
- **Forecast_Deleted** – listagem de previsões apagadas da folha *Forecast_Specs*.



Na figura seguinte pode-se observar um diagrama representativo das vias de produção de combustíveis consideradas no GREET.

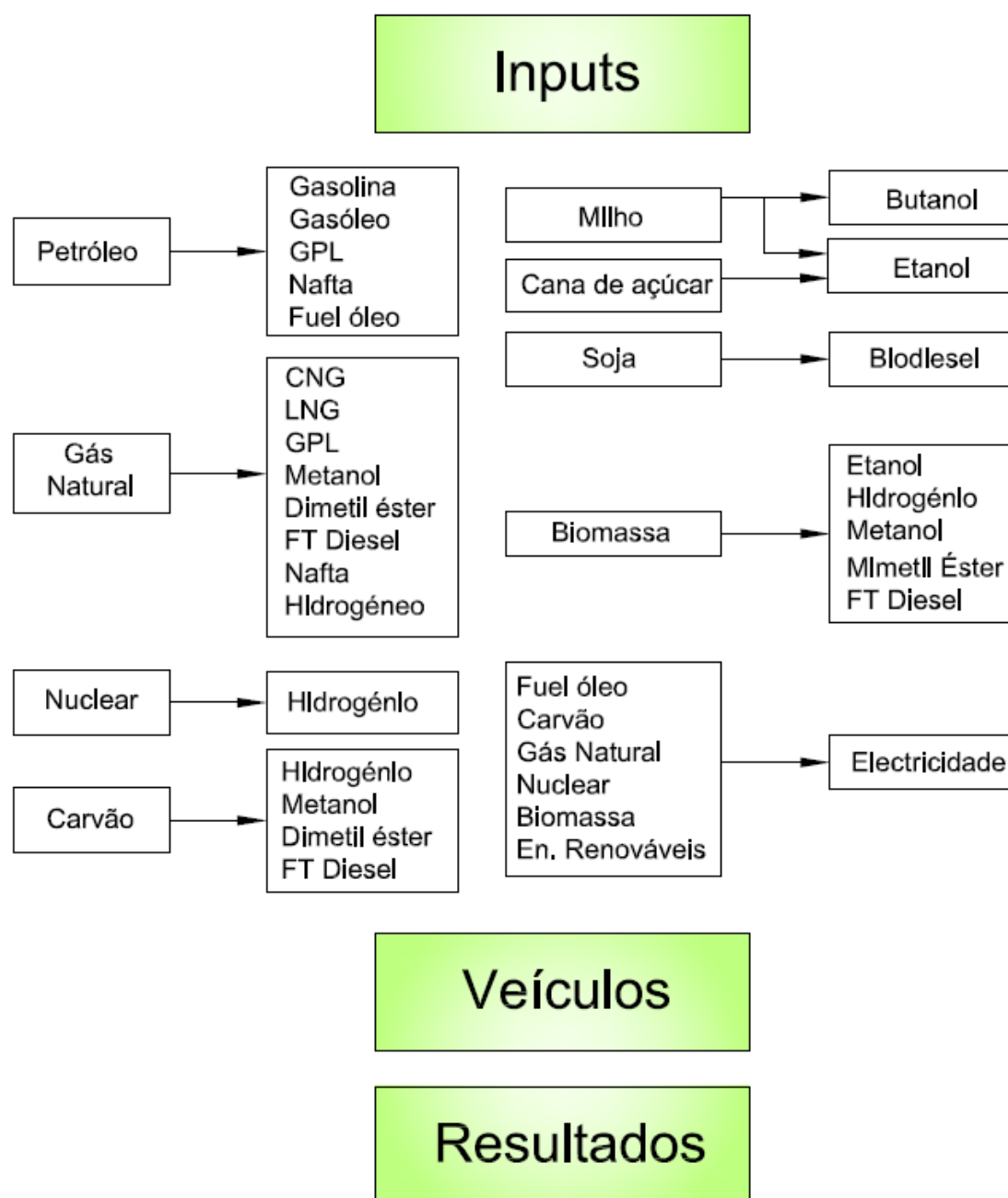


Figura 28. Diagrama representativo das vias de produção de combustíveis consideradas no GREET.



Nas próximas figuras são apresentados os aspectos das folhas iniciais do GREET.

	A	B	C	N	O	P	Q	R
31								
32			Color Scheme for the GREET Model					
33			Clear cells are primarily for calculations and secondary assumptions					
34								
35								
36			Yellow cells are key input assumptions that users can change for their own simulations					
37								
38								
39			Green cells are key input assumptions with probability distribution functions built in					
40								
41								
42			Blue cells are GREET forecast cells for running stochastic simulations					
43								
44								
45			Gray cells are placeholder pathways. Even though simulations of these pathways are completed in GREET, no thorough research was conducted to examine key input assumptions for the pathways.					
46								
47								
48			Cells with red triangle in the upper right corner contain comments. Users are advised to read the comments					
49								
50								
51			Brief Descriptions of GREET 1.8a Worksheets					
52			Description					
53		Sheet	Key input parameters that users can specify for GREET simulations. If users use the GREET GUI program, the GUI input values interact mostly with values in this sheet.					
54		Inputs	Time-series tables for emission factors of combustion technologies applied to stationary sources					
55		EF_TS	Emission factors of combustion technologies by fuel type. This sheet interacts with EF_TS sheet.					
56		EF	Specifications of individual fuels and global warming potentials of GHGs					
57		Fuel_Specs	Flowcharts of transportation and distribution for each energy feedstock and fuel					
58		T&D_Flowcharts	Calculations of energy use and emissions for transportation and distribution of energy feedstocks and fuels					
59		T&D	Share of urban emissions out of total emissions of criteria pollutants for major GREET simulated activities					
60		Urban_Shares	Time-series tables for key parametric assumptions for well-to-pump fuel production processes. This sheet interacts with other fuel production sheets					
61		Fuel_Prod_TS	Calculations of well-to-pump energy use and emissions for petroleum-based fuels (including production of oxygenates)					
62		Petroleum	Calculations of well-to-pump energy use and emissions for NG-based fuels (plus flared gas to liquid fuels; landfill gas to methanol; and biomass to methanol, DME, and FT fuels)					
63		NG	Calculations of well-to-pump energy use and emissions for hydrogen production pathways					
64		Hydrogen	Calculations of energy use and emissions for manufacturing agricultural inputs including fertilizers, herbicides, and insecticides					
65		Ag_Inputs	Calculations of well-to-pump energy use and emissions for producing ethanol from corn and cellulosic biomass					
66		EtOH	Calculations of well-to-pump energy use and emissions for additives to blend ethanol in diesel fuel					
67		E-D_Additives	Calculations of well-to-pump energy use and emissions for biodiesel from soybeans					
68		BD	Calculations of energy use and emissions for coal mining					
69		Coal	Calculations of energy use and emissions for uranium ore mining and uranium fuel production					
70		Uranium	Calculations of energy use and emissions for landfill gas recovery					
		LF_Gas						

Figura 29. Aspecto da folha inicial do GREET 1.7 – Overview.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1			Scenario Control Variables and Input Assumptions					
2			1. Selection of Key Options for Simulation					
3			1.1) Target Year for Simulation					
4			2010					
5								
6			1.2) Point-Estimation or Probability-Estimation Option					
7			no		yes ... To run probability-based simulations			
8					no ... Not to run probability-based simulations (instead, to run point-estimation simulations)			
9			1.3) Time Series Simulation Option					
10			1		1 -- GREET default time-series (TS) values; 2 -- User inputs (adjust all years in TS Tables); 3 -- User inputs (adjust future years in TS Tables); 4 -- User provides TS table data			
11								
12			2. Selection of Vehicle Types for Simulation					
13			1		1 -- Passenger Cars			
14					2 -- Light-Duty Trucks 1			
15					3 -- Light-Duty Trucks 2			
16								
17			3. Key Input Parameters for Simulating Petroleum-Based Fuels					
18			3.1) Petroleum Recovery Options					
19			3.1.a) Efficiency for Petroleum Recovery					
20			3.1.a-i) Conventional Crude Recovery					
21			98.0%					
22			3.1.a-ii) Oil Sands Recovery and Upgrading					
23				Bitumen recovery	Bitumen Upgrading	H2 Use for Upgrading		
24			Surface Mining	94.8%	98.6%	SCF/mmBtu product		
25			In Situ Production	84.3%	98.6%	290.3		
26						111.6		
27			3.1.b) Selection of Oil Sands Recovery Methods					
28			Surface Mining	50.0%				
29			In Situ Production	50.0%				
30								
31			3.1.c) Share of Oil Sands Products in Crude Oil Feed to Refineries					
32			0%					
33								

Figura 30. Aspecto da folha de dados de entrada do GREET 1.7 – Inputs.



Capítulo 5. O modelo MACVC

Como foi referido na secção 1.2, o propósito da elaboração deste trabalho de dissertação de Mestrado consiste na actualização da ferramenta numérica de análise de ciclo de vida GREET. Esta actualização surge da necessidade de criar uma ferramenta capaz de se adaptar à realidade vivida em Portugal. Em consequência, mais que uma mera actualização do modelo já existente, surge agora uma nova ferramenta de utilização simples, intuitiva e perfeitamente adaptada à realidade portuguesa – o modelo MACVC (Modelo de Análise de Ciclo de Vida de Combustíveis).

A simplicidade e fluidez de utilização foram dois pontos-chave tidos em consideração na elaboração do MACVC. Este requer pouca informação do utilizador para fornecer resultados relativos a consumos energéticos e emissões de gasosas.

Ao limitar a quantidade de informação requerida ao utilizador aumenta-se a facilidade e rapidez de obtenção de resultados. Assim, este modelo torna-se uma importante ferramenta para se obter uma pré-análise de ciclo de vida de combustíveis.

Para um estudo mais preciso e aprofundado é permitido o manuseamento da base de dados de forma a adaptá-la a casos específicos ou cenários. A liberdade de manuseamento da base de dados permite ao utilizador o estudo de vários cenários alternativos comparando consumos e emissões.

A base de dados do MACVC foi elaborada de forma a manter as mesmas características da base existentes no GREET, mas adaptada aos processos, equipamentos e veículos existentes em Portugal e na Europa. A elaboração da base de dados centrou-se no levantamento de informação relativa a todas as etapas do ciclo de vida dos combustíveis. Estas etapas vão desde a produção de matérias primas, passando pela produção dos combustíveis e culminando na sua utilização através dos veículos.

Ao longo deste capítulo será descrito o princípio de funcionamento do modelo MACVC, assim como os pressupostos e as referências utilizadas na elaboração da base de dados.



5.1. Estrutura do modelo MACVC

O MACVC apresenta uma estrutura modular em tudo semelhante ao seu “antecessor” o GREET. Encontra-se dividido numa série de folhas de cálculo onde são abordados de forma autónoma as diversas etapas do ciclo de vida dos combustíveis, as suas propriedades, dados de consumos e emissões relativos aos veículos e dados referentes à simulação propriamente dita.

A estrutura do modelo foi desenvolvida de forma a facilitar a utilização e de, a todo o momento o utilizador poder alterar a base de dados existente adaptando-a às suas necessidades.

Nas secções seguintes serão abordadas individualmente as páginas constituintes do programa.

5.1.1. Folha de rosto

Na folha de rosto é, em primeiro lugar, apresentado o programa e identificado o seu autor. De seguida é identificado o código de cores adoptado e explicado o seu significado. Por fim é apresentada uma descrição das folhas constantes no modelo de forma a facilitar a sua utilização.

Desenvolvido por:
Rui Tiago Teixeira Monteiro n.º 28220
rui.tiago@ua.pt



MACV.C.P.

Modelo de Análise de Ciclo de Vida e Combustíveis em Portugal

Código de cores em vigor no M.A.C.E.E.T.

- Células da base de dados definidas para cálculos intermédios do modelo
- Células definidas para introdução de dados pelo utilizador

Descrição de conteúdos

Folha	Descrição
Dados de entrada	Introdução pelo utilizador os dados básicos para a realização da simulação de análise de ciclo de vida dos combustíveis
Dados dos combustíveis	Características dos combustíveis e factores de aquecimento global de gases de efeito estufa
Factores de Emissão	Factores de emissão associados a tecnologias de combustão
Petróleo	Cálculo de consumos energéticos e emissões poluentes associadas à produção de combustíveis derivados de petróleo
Carvão	Cálculo de consumos energéticos e emissões poluentes associadas à extração e preparação de carvão
Electricidade	Cálculo de consumos energéticos e emissões poluentes associadas à produção eléctrica em Portugal
Sistema agrícola	Cálculo de consumos energéticos e emissões poluentes associadas à produção agrícola, fertilizantes, herbicidas e insecticidas
Biodiesel	Cálculo de consumos energéticos e emissões poluentes associadas à produção de biodiesel
Veículos	Cálculo de consumo de combustível e emissões poluentes associadas ao funcionamento de veículos
Resultados	Resultados dos consumos energéticos e emissões (well-to-pump e Well-to-wheels) decorrentes da simulação realizada
Gráficos	Representações gráficas de resultados obtidos da simulação realizada

Figura 31. Aspecto global da folha de rosto do MACVC.



5.1.2. Dados de entrada

A folha dos dados de entrada está reservada para a introdução pelo utilizador dos dados que servirão para dar início à simulação no modelo. Nesta folha os dados a introduzir pelo utilizador estão divididos em duas categorias: dados relativos ao transporte de matérias primas e combustíveis e dados relativos à simulação a efectuar.

Dados de entrada para simulação	
1. Dados relativos ao transporte de matérias primas e combustíveis (Transportes)	
1.1. Norma dos camiões de transporte	
2	0 - Convencional 1 - Euro 1 2 - Euro 2 3 - Euro 3 4 - Euro 4 5 - Euro 5
1.2. Consumo de combustível dos camiões de transporte	
40	l/100km
1.3. Factor de carga dos navios de carga na viagem de ida	
100%	
1.4. Factor de carga dos navios de carga na viagem de retorno	
10%	
1.5. Velocidade média das viagens de navio (ida e retorno)	
30	km/h
2. Dados relativos à simulação a efectuar	
2.1. Velocidade média da viagem a simular	
40	km/h
2.2. Emissões urbanas decorrentes do funcionamento dos veículos	
50,0%	
2.3. Conteúdo de Biodiesel da mistura de combustível	
3	1 - 10% Biodiesel 6 - 60% Biodiesel 2 - 20% Biodiesel 7 - 70% Biodiesel 3 - 30% Biodiesel 8 - 80% Biodiesel 4 - 40% Biodiesel 9 - 90% Biodiesel 5 - 50% Biodiesel

Figura 32. Aspecto global da folha *Dados de entrada*.

O primeiro grupo de dados actua sobre os cálculos efectuados na folha *Transportes* que será descrita mais adiante. Estes são relativos às características dos veículos (terrestres e marítimos) utilizados para os transportes das variadas materiais primas e combustíveis e às condições em que é efectuado o transporte. Os dados pedidos neste grupo são apresentados de seguida:

- **Norma dos camiões de transporte** – o utilizador especifica qual a norma a que se encontram sujeitos os camiões utilizados no transporte das matérias primas e combustíveis utilizados na simulação. Os valores inseridos nesta célula devem ser números inteiros compreendidos entre 0 e 5, correspondendo o 0 a veículos convencionais (pré norma Euro) e o 5 a veículos abrangidos pela norma Euro 5. O valor inserido nesta célula irá remeter aos valores de consumo energético e emissões correspondentes à norma escolhida.
- **Consumo de combustível dos camiões de transporte** – ao preencher esta célula o utilizador especifica o consumo de combustível dos camiões. Em conjunto com a capacidade de carga



dos mesmos permite a determinação da intensidade energética dos camiões (energia consumida por produto transportado e quilómetro percorrido – $J/(\text{ton.km})$) na folha *Transportes*.

- **Factor de carga dos navios de carga (viagens de ida e retorno)** – o preenchimento desta célula permite a determinação do consumo de energia dos navios em relação à energia “transportada” ($J/kWh_{\text{transportado}}$) e posteriormente determinar a intensidade energética ($J/(\text{ton.km})$).
- **Velocidade média das viagens de navio (ida e retorno)** – permite, em conjunto com o factor de carga introduzido, a determinação da intensidade energética ($J/(\text{ton.km})$) dos navios de carga.

1. Dados relativos ao transporte de matérias primas e combustíveis

1.1. Norma dos camiões de transporte

- 2 0 - Convencional
1 - Euro 1
2 - Euro 2
3 - Euro 3
4 - Euro 4
5 - Euro 5

1.2. Consumo de combustível dos camiões de transporte

40 l/100km

1.3. Factor de carga dos navios de carga na viagem de ida

100%

1.4. Factor de carga dos navios de carga na viagem de retorno

10%

1.5. Velocidade média das viagens de navio (ida e retorno)

30 km/h

Figura 33. Dados relativos ao transporte de matérias primas e combustíveis.

No caso dos dados relativos à simulação a efectuar, estes referem-se basicamente às condições em que é efectuada a simulação e à composição do biodiesel a utilizar. Os referidos dados são os seguintes:

- **Velocidade média das viagens a simular** – nesta célula o utilizador insere no modelo o valor médio da velocidade de operação dos veículos a simular (km/h). O valor inserido nesta célula irá ter influência nos cálculos efectuados para a determinação de consumos energéticos e emissões dos veículos. Esta célula tem influência directa sobre os valores apresentados na folha *Resultados*.
- **Emissões urbanas decorrentes do funcionamento dos veículos** – nesta célula é inserida a fracção de utilização dos veículos em ambiente urbano. O valor inserido nesta célula representa a fracção



das emissões poluentes que é libertada em ambientes urbanos influenciando directamente na qualidade do ar e a saúde dos habitantes.

- **Conteúdo de biodiesel na mistura de combustível** – nesta célula é inserida a percentagem de biodiesel que é adicionada na mistura combustível utilizada na simulação. O valor inserido irá ter influência directa nos consumos energéticos e emissões calculados na folha *Resultados*.

2. Dados relativos à simulação a efectuar

2.1. Velocidade média da viagem a simular

40 km/h

2.2. Emissões urbanas decorrentes do funcionamento dos veículos

50,0%

3.1 Conteúdo de Biodiesel da mistura de combustível

3

1 - 10% Biodiesel 6 - 60% Biodiesel
 2 - 20% Biodiesel 7 - 70% Biodiesel
 3 - 30% Biodiesel 8 - 80% Biodiesel
 4 - 40% Biodiesel 9 - 90% Biodiesel
 5 - 50% Biodiesel

Figura 34. Dados relativos à simulação a efectuar.

5.1.3. Dados dos combustíveis

Na folha *Dados dos combustíveis* estão disponíveis informações acerca das características e propriedades dos combustíveis e gases relevantes para a simulação.

Propriedades dos combustíveis								
Propriedade	Unidades	Combustíveis líquidos						Gás natural
		Gasóleo	Óleo Combustível	Crude	Gasolina	Biodiesel	GPL	
Massa volúmica	kg/m³	875,00	991,46	846,32	744,90	900,00	508,15	0,78
Poder calorífico inferior (PCI)	MJ/m³	35.809,73	39.109,00	36.149,84	32.363,96	32.600,00	23.682,65	36,62
Fracção de Enxofre (S)	%	0,02%	0,50%	1,80%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Fracção de Carbono (C)	%	86,50%	86,80%	85,30%	86,30%	77,60%	82,00%	72,40%

Combustíveis sólidos			
Propriedade	Unidades	Carvão	Resíduos florestais
Poder calorífico inferior (PCI)	MJ/m³	20.621,35	13.971,88
Fracção de Enxofre (S)	%	1,10%	0,00%
Fracção de Carbono (C)	%	63,70%	51,70%

Factores de Aquecimento Global (em relação ao CO ₂)	
CO ₂	1
CH ₄	23
N ₂ O	296
VOC	0
CO	0
NO _x	0

Fracção de Carbono e Enxofre nos poluentes	
Carbono no CO ₂	0,27
Carbono no CH ₄	0,75
Carbono no VOC	0,85
Carbono no CO	0,43
Enxofre no SO _x	0,50

Figura 35. Aspecto global da folha *Dados dos combustíveis*.



Entre todas as propriedades que os combustíveis apresentam, as mais relevantes para o cálculo de consumos energéticos e emissões gasosas são a massa volúmica, o poder calorífico inferior (PCI) e os conteúdos de enxofre e carbono.

- **Poder calorífico inferior (PCI) (MJ/m^3)** de um combustível é expresso pela quantidade de calor produzido na combustão por unidade de massa de combustível. Quanto maior for este valor, mais energético é o combustível e, em consequência, menor será a quantidade necessária de combustível.
- **Massa volúmica (kg/m^3)** de um dado combustível representa a massa por unidade de volume do combustível. Esta propriedade está directamente relacionada com o sistema de doseamento do combustível ao motor e com os padrões de atomização.
- **Conteúdo de enxofre (%)** de um combustível representa a quantidade desse elemento na constituição do combustível. A presença de enxofre conduz, após combustão, à produção de dióxido de enxofre (SO_2) que combinado com a água existente na atmosfera resulta em chuva ácida.
- **Conteúdo de carbono (%)** de um combustível representa a quantidade desse elemento na constituição do combustível. Quanto maior for o conteúdo de carbono maior será a capacidade de combustão e maior será a produção de CO_2 e de CO.

Combustível	Massa Volúmica (kg/m^3)	PCI (MJ/m^3)	Conteúdo de Enxofre (%)	Conteúdo de Carbono (%)
Fuel óleo	991,5	39109	0,5%	86,8%
Gasóleo	875	35810	0,02%	86,5%
Biodiesel	900	32600	0,01%	77,6%
Gasolina	744,9	32364	0%	86,3%
GPL	508,2	23683	0%	82%

Tabela 12. Propriedades de combustíveis líquidos na *folha Dados dos combustíveis*.

Fonte: www.eere.energy.gov

Combustível	Massa Volúmica (kg/m^3)	PCI (MJ/m^3)	Conteúdo de Enxofre (%)	Conteúdo de Carbono (%)
Gás Natural	0,78	36,6	0%	72,4%
Carvão	-	20621,4	1,11%	63,4%
Res. Florestais	-	13971,9	0%	51,7%

Tabela 13. Propriedades de combustíveis gasosos e sólidos na *folha Dados dos combustíveis*.

Fonte: www.eere.energy.gov



Para além de propriedades dos combustíveis abrangidos no modelo esta folha apresenta também os factores de aquecimento global dos gases resultantes da combustão. Estes factores são dados em relação ao potencial de aquecimento global do dióxido de carbono (CO_2). Esta é importante forma de comparação dos potenciais de aquecimento global dos gases libertados e determinação da sua contribuição para o problema do aquecimento global. Estes factores servem para ser efectuada a conversão das emissões dos gases em emissões equivalentes de CO_2 .

Gás	Factor de aquecimento global
CO_2	1
CH_4	23
N_2O	296
VOC	0
CO	0
NO_2	0

Tabela 14. Factores de aquecimento global na folha *Dados dos combustíveis*.

Fonte: IPCC, *Climate Change 2001: The Scientific Basis*

5.1.4. Factores de emissão

Na folha *Factores de emissão* são apresentados os factores de emissão associados às tecnologias de combustão aplicadas aos processos de produção e transporte tanto de matérias primas como de combustíveis. Estes factores são utilizados para o cálculo das emissões totais associadas às fases de produção e transporte para análise do “poço à bomba”.

Na primeira secção desta folha é fornecida uma listagem dos factores de emissão utilizados no MACVC para as tecnologias de combustão estacionárias. Estas são utilizadas nas fases produtivas de matérias primas e combustíveis. Os factores apresentados nesta secção têm influência directa nos cálculos de emissões efectuados nas folhas *Petróleo*, *Carvão*, *Electricidade*, *Sistema agrícola* e *Biodiesel*. Devido à dificuldade de obtenção de fontes alternativas foram aplicados os factores fornecidos pela base de dados do GREET 1.7 submetidos às devidas conversões de unidades para unidades S.I.

Na tabela seguinte são apresentados os factores de emissão utilizados para as tecnologias de combustão aplicadas nas fases produtivas contempladas no MACVC. Convém referir, que os factores de emissão apresentados nesta secção da folha são dados em g por kWh de combustível queimado.



Combustível	Fuel óleo		Gasóleo		
	Caldeira industrial	Caldeira industrial	Motor estacionário	Turbina industrial	Tractor agrícola
VOC	0,007	0,004	0,240	0,005	0,236
CO	0,054	0,057	1,232	0,029	1,239
NO _x	0,427	0,281	2,326	0,449	2,338
PM10	0,152	0,145	0,211	0,058	0,213
PM2.5	0,098	0,130	0,190	0,046	0,190
SO _x	0,691	0,027	0,027	0,027	0,027
CH ₄	0,011	0,001	0,014	0,003	0,002
N ₂ O	0,001	1,331	6,826	6,826	0,003
CO ₂	290,3	266,8	264,2	266,8	264,2

Tabela 15. Factores de emissão para tecnologias de combustão estacionárias (parte I).

Fonte: GREET 1.7

Combustível	Gás natural				
	Motor estacionário	Caldeira industrial	Turbina ciclo simples	Turbina ciclo combinado	GN inflamado
VOC	0,140	0,003	0,003	0,012	0,009
CO	1,169	0,098	0,082	0,082	0,089
NO _x	4,096	0,102	0,386	0,055	0,167
PM10	0,019	0,010	0,012	0,007	0,013
PM2.5	0,019	0,010	0,012	0,007	0,013
SO _x	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
CH ₄	1,259	0,004	0,015	0,015	0,167
N ₂ O	0,005	0,004	0,005	0,005	0,004
CO ₂	197,0	202,6	202,6	202,6	202,1

Tabela 16. Factores de emissão para tecnologias de combustão estacionárias (parte II).

Fonte: GREET 1.7

Combustível	Carvão		Biomassa
	Turbina simples	Caldeira industrial	Caldeira industrial
VOC	0,005	0,007	0,018
CO	0,042	0,260	0,262
NO _x	0,150	0,530	0,375
PM10	0,022	0,341	0,043
PM2.5	0,011	0,171	0,022
SO _x	0,150	0,683	0,014
CH ₄	0,017	0,014	0,013
N ₂ O	0,017	0,003	0,038
CO ₂	370,2	369,8	443,1

Tabela 17. Factores de emissão para tecnologias de combustão estacionárias (parte III).

Fonte: GREET 1.7



A segunda secção desta folha contém os factores de emissão para os meios de transporte para matérias primas e combustíveis no MACVC, tendo como base os combustíveis convencionais. Os meios de transporte considerados no modelo são navios de transporte (incluindo petroleiros) e camiões. Relativamente aos camiões de transporte, os factores de emissão são obtidos através das equações apresentadas nos Anexo 11, Anexo 13, Anexo 15, Anexo 17 e Anexo 19. No caso dos navios de transporte, os factores de emissão considerados são apresentados na tabela seguinte.

	Factor de emissão (g/kWh)
VOC	0,217
CO	0,670
NO _x	7,877
PM ₁₀	0,607
PM _{2,5}	0,607
SO _x	4,889
CH ₄	0,005
N ₂ O	0,007
CO ₂	287,0

Tabela 18. Factores de emissão para navios de transporte internacional.

Fonte: *Emission Inventory Guidebook, 2007*

5.1.5. Petróleo

Na folha *Petróleo* são efectuados os cálculos de consumos energéticos e emissões associadas às actividades de extracção e refinamento de petróleo. É ainda contemplada a produção de combustíveis derivados de petróleo, sendo estes:

- Fuel óleo
- Gasolina
- Gasóleo
- Gás petróleo líquido (GPL)

Embora o fuel óleo não seja considerado um combustível automóvel, é incluído nesta folha principalmente para cálculo de consumos e emissões associadas à produção eléctrica e de combustíveis. A matéria prima considerada para produção de combustíveis é o crude e os consumos e emissões associadas à sua extracção influem sobre os valores totais da produção dos combustíveis.



Esta folha é composta por três secções:

- Peso relativo das tecnologias de combustão estacionárias.
- Consumo de energia e emissões para extracção de crude e produção de combustíveis.
- Sumário dos consumos e emissões globais do processo.

Na primeira secção são registados os pesos relativos das diferentes tecnologias de combustão referidas na secção 5.3.4. deste trabalho. Através do quadro apresentado nesta secção podem ser determinados os consumos energéticos e emissões associados a cada tecnologia nos diferentes processos e, no final, os consumos e emissões globais dos processos. Devido à falta de fontes alternativas de informação credíveis, foram usados como base os valores da base de dados do GREET1.7.

Equipamento	Extracção Petróleo	Refinação Fuel óleo	Produção Gasóleo	Produção Gasolina	Produção GPL
Caldeira industrial Fuel óleo	100%	100%	100%	100%	100%
Caldeira industrial Gasóleo	25%	33%	33%	33%	33%
Motor estacionário Gasóleo	50%	33%	33%	33%	33%
Turbina Gasóleo	25%	34%	34%	34%	34%
Motor estacionário Gás natural	50%	0%	0%	0%	0%
Turbina Gás natural	0%	20%	20%	20%	20%
Caldeira industrial Gás natural	50%	75%	75%	75%	75%
Caldeira industrial Carvão	0%	100%	100%	100%	100%

Tabela 19. Peso relativo das tecnologias de combustão aplicadas no processo de produção de combustíveis.

Fonte: GREET 1.7

A segunda secção da folha *Petróleo* está reservada para os cálculos de consumos e emissões de cada processo desde a extracção de petróleo, passando pelo refinamento de fuel óleo e culminando na produção dos diversos combustíveis derivados do petróleo. Nesta secção são consideradas as eficiências de conversão dos processos, o consumo directo de combustível por tipo e o consumo indirecto de combustível por tecnologia de combustão. Os resultados obtidos nesta secção são directamente influenciados pelos valores introduzidos na secção anterior (peso relativo das tecnologias de combustão) e pelos factores de emissão da folha *Factores de emissão*.



Os combustíveis consumidos e o seu peso relativo nos processos abrangidos nesta folha são apresentados na tabela seguinte:

Combustível	Extracção Petróleo	Refinação Fuel óleo	Produção Gasóleo	Produção Gasolina	Produção GPL
Crude	1%	0%	0%	0%	0%
Fuel óleo	1%	3%	3%	3%	3%
Gasóleo	15%	0%	0%	0%	0%
Gasolina	2%	0%	0%	0%	0%
Gás natural	62%	30%	30%	30%	30%
Carvão	0%	13%	13%	13%	13%
Electricidade	19%	4%	4%	4%	4%
Gases de processo	0%	50%	50%	50%	50%

Tabela 20. Peso relativo dos combustíveis utilizados na folha *Petróleo*.

Fonte: GREET 1.7

Outros dados importantes para o cálculo de consumos energéticos e emissões nesta folha são a eficiência de conversão global dos processos e a fracção de emissões urbanas. Estes valores são baseados em valores tomados na base de dados do GREET1.7 e fornecidos pela Galp Energia (<http://press.galpennergia.com>).

	Extracção Petróleo	Refinação Fuel óleo	Produção Gasóleo	Produção Gasolina	Produção GPL
Eficiência global	98%	96%	96%	96%	93%
Emissões urbanas	2%	65%	65%	65%	65%

Tabela 21. Valores de eficiência global e emissões urbanas tomados na folha *Petróleo*.

Fontes: GREET 1.7

Galp, 2007

Através dos valores de eficiência da tabela anterior em conjunto com os valores da Tabela 21, pode-se determinar o consumo energético dos diferentes processos. Este consumo ($\text{J/kWh}_{\text{transformado}}$) é expresso por unidades de energia consumida por unidade de energia de combustível transformado.

As emissões gasosas são calculadas através dos factores de emissão que constam na folha *Factores de emissão* em conjunto com os valores da Tabela 21. Os valores apresentados para as emissões gasosas são expressos em $\text{g/kWh}_{\text{transformado}}$.

As emissões urbanas ($\text{g/kWh}_{\text{transformado}}$) são calculadas através do valor introduzido na Tabela 21

Na terceira secção da folha *Petróleo* é apresentado o resumo dos consumos energéticos e das emissões calculadas nesta folha.



5.1.6. Carvão

Na folha *Carvão* são calculados os consumos e emissões associados aos processos de extracção e processamento de carvão. Os resultados desta folha são usados nas restantes folhas do modelo como combustível ou matéria prima.

À semelhança do que acontece na folha relativa ao petróleo, esta folha é encabeçada com uma tabela onde são apresentados os pesos relativos das várias tecnologias de combustão aplicadas no processo. Novamente foram considerados os valores apresentados pela base de dados do GREET.

Equipamento	Extracção e processamento de carvão
Caldeira industrial Fuel óleo	100%
Caldeira industrial Diesel	33%
Motor Diesel	33%
Turbina Diesel	34%
Motor Gasolina	0%
Motor Gás natural	50%
Turbina Gás natural	0%
Caldeira industrial Gás natural	50%
Caldeira industrial Carvão	100%

Tabela 22. Peso relativo das tecnologias de combustão aplicadas no processo de extracção de carvão.

Fonte: GREET 1.7

A segunda secção da folha *Carvão* está reservada para os cálculos de consumos e emissões do processo global de extracção e processamento de carvão. Nesta secção são consideradas as eficiências de conversão dos processos, o consumo directo de combustível por tipo e o consumo indirecto de combustível por tecnologia de combustão. Os resultados obtidos nesta secção são directamente influenciados pelos valores introduzidos na secção anterior (peso relativo das tecnologias de combustão) e pelos factores de emissão da folha *Factores de emissão*.



Os combustíveis consumidos e o seu peso relativo nos processos abrangidos nesta folha são apresentados na tabela seguinte:

Combustível	Extracção e processamento de carvão
Fuel óleo	7%
Gasóleo	56%
Gasolina	3%
Gás natural	1%
Carvão	9%
Electricidade	24%

Tabela 23. Peso relativo dos combustíveis utilizados no processo de extracção de carvão.

Fonte: GREET 1.7

A eficiência global do processo e a fracção de emissões urbanas podem ser observadas na tabela apresentada que se segue.

	Extracção e processamento de carvão
Eficiência global	97%
Emissões urbanas	2%

Tabela 24. Eficiência global e emissões associadas ao processo de extracção de carvão.

Fonte: GREET 1.7

Através dos valores dos pesos de cada combustível no processo de extracção de carvão é possível determinar a quantidade de energia consumida provinda de cada combustível. Este consumo ($\text{J/kWh}_{\text{transformado}}$) é expresso em unidades de energia consumida por unidade de energia de combustível transformado.

As emissões gasosas são calculadas através dos factores de emissão que constam na folha *Factores de emissão* em conjunto com os valores da Tabela 28. Os valores apresentados para as emissões gasosas são expressos em $\text{g/kWh}_{\text{transformado}}$.



5.1.7. Electricidade

Esta folha é reservada para o cálculo de consumos energéticos e emissões associadas à produção eléctrica em Portugal. A electricidade produzida será posteriormente utilizada nos diversos processos de produção de combustíveis. Os resultados apresentados nesta folha irão influenciar os resultados de todas as outras folhas pois todos os processos contemplados no modelo apresentam consumo de energia eléctrica.

À semelhança com outras folhas do modelo, esta é composta por três secções, sendo elas:

- Produção eléctrica em Portugal.
- Consumo de energia e emissões provenientes da produção eléctrica.
- Sumário dos consumos globais de energia e emissões decorrentes da produção eléctrica.

Na primeira secção, dedicada à produção eléctrica em Portugal, são basicamente apresentadas as quotas de produção de energia eléctrica em Portugal por fonte de energia e os pesos relativos que os diferentes combustíveis e tecnologias de combustão detêm na produção. Para o efeito foi tida em conta a informação fornecida pelos dados da EDP para o ano de 2007 e da Agência Internacional de Energia.

	%	GWh
Térmica	71%	24198
Hídrica	26%	8954
Eólica	3%	735
Total	100%	33887

Tabela 25. Quotas de produção de energia eléctrica em Portugal por fonte de energia.

Fonte: EDP, 2007

Relativamente à parte da energia eléctrica proveniente das centrais térmicas (onde ocorre queima de combustíveis), o peso dos diversos combustíveis, com base nos dados fornecidos pela Agência Internacional de Energia para o ano de 2005, é expresso na tabela seguinte.

Combustível	%	Tep	GWh
Carvão	39%	2701,9	9316,2
Fuel óleo	9%	617,6	2129,4
Gás natural	34%	2407,2	8300
Gasóleo	13%	940,4	3242,5
Biomassa	5%	350,9	1209,9
Total	100%	7018	24198

Tabela 26. Peso relativo dos combustíveis na produção eléctrica em Portugal.

Fonte: IEA, 2005



As principais tecnologias de combustão aplicadas à produção de energia eléctrica nas diferentes centrais eléctricas podem ser observadas na tabela seguinte.

Combustível	Equipamento	Peso de utilização	Eficiência (processo)
Carvão	Caldeira	100%	30%
Fuel óleo	Caldeira	100%	35%
	Caldeira	20%	35%
Gás natural	Turbina ciclo simples	36%	35%
	Turbina ciclo combinado	44%	55%
Gasóleo	Caldeira industrial	100%	35%
Biomassa	Caldeira industrial	100%	30%

Tabela 27. Pesos relativos e eficiências das tecnologias de combustão na produção eléctrica.

Fonte: GREET 1.7

Os valores de eficiência global da Tabela 27 são determinados através do peso de utilização das tecnologias de combustão aplicadas por cada combustível e da sua eficiência individual.

Na segunda secção desta folha são executados os cálculos para o consumo energético e emissões associadas a cada tipo de central de produção eléctrica. Os valores obtidos nesta secção são todos eles fornecidos em relação à energia eléctrica distribuída e disponível para utilização, g ou J/kWh_{distribuída}.

Os consumos globais de energia na produção total de electricidade são determinados com recurso aos consumos constantes na tabela anterior em conjunto com os pesos relativos de cada combustível da Tabela 27.

As emissões gasosas são calculadas através dos factores de emissão que constam na folha *Factores de emissão* em conjunto com os valores da Tabela 27. Os valores apresentados para as emissões gasosas são expressos em g/kWh_{distribuída}.

Na terceira secção é apresentado o resumo dos cálculos efectuados ao longo da folha Electricidade.



5.1.8. Transportes

Na folha *Transportes* são efectuados os cálculos para determinação dos consumos e emissões associados ao transportes de todas as matérias primas e combustíveis contemplados no modelo. Os resultados obtidos nesta folha são, à semelhança das folhas mencionadas até ao momento, expressos por unidade de energia do combustível transportado ($\text{kWh}_{\text{transportado}}$) ou então no caso do transporte de matérias primas, por tonelada transportada. Estes valores apresentados são usados na folha de *Resultados* para o cálculo do peso dos transportes na análise “poço à bomba” dos diversos combustíveis.

Nesta folha foram consideradas todas as matérias primas e combustíveis abrangidos no MACVC. As matérias primas consideradas são utilizadas nas folhas *Petróleo* e *Sistema agrícola*. No caso da folha *Petróleo*, a principal matéria prima é o crude, já no caso da folha *Sistema agrícola*, as matérias primas são as seguintes:

- Sementes de colza
- Grãos de colza
- Amónia
- Ureia
- Ácido Nítrico
- Nitrato de amónia
- Ácido sulfúrico
- Rocha fosfórica
- Ácido fosfórico
- K_2O
- CaCO_3
- Herbicidas
- Insecticidas



Na figura seguinte pode-se observar o diagrama representativo dos cálculos efectuados nesta folha e a sua interligação.

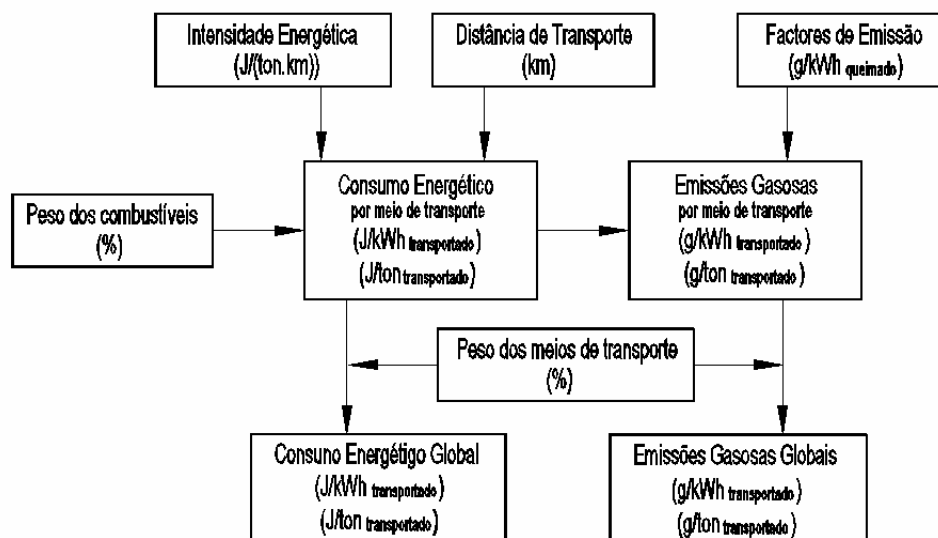


Figura 36. Diagrama representativo dos cálculos efectuados na folha *Transportes*.

Para o cálculo dos consumos energéticos e emissões gasosas foram consideradas separadamente as viagens de transporte das cargas e as de retorno à origem. Nestas, os diferentes factores de carga conduzem a diferentes intensidades energéticas e, em consequência, a diferentes consumos e emissões. Para a determinação das intensidades energéticas dos meios de transporte têm de ser consideradas, para além dos factores de carga, a velocidade média das viagens e a capacidade de transporte dos veículos. Com as intensidades energéticas e as distâncias médias das viagens de transporte de matérias e combustíveis, podem-se calcular os consumos energéticos.

No caso do transporte de matérias primas, os consumos energéticos são calculados de forma análoga sendo agora expresso em relação à quantidade transportada, isto é, em $J/ton_{transportada}$.

As emissões gasosas são calculadas recorrendo aos factores de emissão relativos aos meios de transporte da folha *Factores de emissão*, aos valores de intensidade energética e às distâncias percorridas no transporte. À semelhança das folhas anteriores, também aqui as emissões gasosas são expressas em $g/kWh_{transportado}$ no caso do transporte de combustíveis. Já no caso do transporte de matérias primas, as unidades são $g/ton_{transportada}$.

Na última secção desta folha é apresentado o resumo dos consumos energéticos e emissões calculados anteriormente. Aqui os consumos e emissões de camiões e navios são somados de acordo com o seu peso relativo no transporte de cada combustível ou matéria prima.



5.1.9. Químicos

Na folha *Químicos* é contemplada a produção de produtos químicos aplicados à produção de matéria prima para a produção de biodiesel. No seio destes produtos químicos estão incluídos os fertilizantes, herbicidas e insecticidas.

No MACVC são considerados três fertilizantes (fertilizantes NPK):

- Azoto (onde se incluem amónia, ureia e nitrato de amónia)
- Potássio
- Fósforo

Esta folha é igualmente constituída por três secções principais, sendo elas:

- Peso relativo das tecnologias de combustão estacionárias.
- Consumo de energia e emissões decorrentes da produção de químicos agrícolas.
- Sumário do consumo de energia e emissões dos químicos agrícolas.

Na primeira secção são registados os pesos relativos das diferentes tecnologias de combustão aplicadas nos processos produtivos. Através destes valores podem ser determinados os consumos energéticos e emissões associados a cada tecnologia nos diferentes processos e, no final, os consumos e emissões globais dos processos. Mais uma vez devido à falta de fontes alternativas de informação credíveis, foram usados como base os valores da base de dados do GREET1.7.

Equipamento	Produção de Azoto	Produção de P_2O_5	Produção de K_2O	Produção de $CaCO_3$	Produção de herbicidas	Produção de insecticidas
Caldeira Fuel óleo	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Caldeira Diesel	80%	80%	80%	80%	80%	80%
Motor Diesel	15%	15%	15%	15%	15%	15%
Turbina Diesel	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Caldeira Gás natural	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Caldeira Carvão	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabela 28. Peso relativo das tecnologias de combustão aplicadas na de produção de químicos agrícolas.

Fonte: GREET 1.7

Na segunda secção são calculados os consumos e emissões decorrentes dos vários processos de produção de químicos utilizados na produção agrícola. Aqui, para o cálculo dos consumos energéticos para a produção dos diversos produtos químicos são tidos em conta os combustíveis utilizados, os seus pesos relativos em cada processo e a energia consumida na sua própria produção.



Finalmente, na última secção desta folha é apresentado o resumo dos consumos e emissões associados aos fertilizantes, herbicidas e insecticidas utilizados nas explorações agrícolas. Nesta secção são adicionados os consumos e emissões decorrentes da produção das matérias primas de cada produto de acordo com os seus pesos no produto final. É ainda importante referir que os valores apresentados são expressos em $\text{J/kg}_{\text{produzido}}$ no caso de se tratarem de consumos energéticos ou $\text{g/kg}_{\text{produzido}}$ para as emissões gasosas.

5.1.10. Biodiesel

Nesta folha são calculados todos os consumos energéticos e emissões gasosas associadas à produção de biodiesel a partir de grãos de colza. Nestes cálculos são tidas em conta todas as fases do processo produtivo, desde a plantação de colza, transporte de grãos, extracção de óleo, transesterificação do óleo em biodiesel puro e posterior transporte.

O girassol é a oleaginosa de cultivo mais tradicional em Portugal mas o défice em produtos alimentares e a grande procura do seu grão para fins alimentares torna necessária a busca por culturas alternativas. Neste contexto a colza apresenta-se como uma cultura com boas perspectivas de aplicação apresenta baixos custos de produção e um óleo de excelente qualidade para produção de biodiesel (Lourenço M., 2006).

Os procedimentos de cálculo aplicados nesta folha são em tudo semelhantes aos aplicados na folha *Petróleo*. No entanto, nesta folha há uma nova secção reservada para os rendimentos de produção dos processos associados à produção de biodiesel e à distribuição de recursos entre produtos e co-produtos.

Assim sendo, a folha Biodiesel encontra-se dividida em quatro secções:

- Alocação de recursos e rendimentos.
- Peso relativo das tecnologias de combustão estacionárias.
- Cálculo de consumo de energia e emissões em cada estágio.
- Sumário do consumo e emissões globais da produção de biodiesel.

Na primeira secção é apresentado um quadro com informação de base para os cálculos a efectuar nas secções seguintes. Na tabela seguinte são apresentadas as produtividades dos processos empregues nas diferentes fases da produção de biodiesel. Estes valores foram baseados em balanços mássicos constantes em relatórios da Comissão Europeia de 2000 relativos a plantações energéticas no espaço europeu.



Produtividade da plantação de colza	kg _{colza} /ha	1700
Produtividade de grãos de colza	Kg _{grãos} /kg _{colza}	0,37
Consumo de grãos para prod. Óleo	kg _{grãos} /kg _{óleo}	2,38
Consumo de óleo para prod. biodiesel	kg _{óleo} /kg _{biodiesel}	1,04

Tabela 29. Produtividades dos processos associados à produção de biodiesel de colza.

Fonte: Teixeira R., *Análise de viabilidade da produção de biocombustíveis para o sector dos transportes, com recursos a matéria-prima endógena*, 2007

Na secção seguinte são registados os pesos relativos das diferentes tecnologias de combustão aplicadas nos processos produtivos. Através destes valores podem ser determinados os consumos energéticos e emissões associados a cada tecnologia nos diferentes processos. No final, em conjunto com os valores apresentados nas tabelas anteriores são calculados os consumos e emissões globais dos processos.

Equipamento	Plantação de colza	Extracção de óleo	Produção de biodiesel
Motor estacionário	20%	0%	0%
Tractor agrícola	80%	0%	0%
Caldeira Gás natural	0%	100%	100%

Tabela 30. Peso relativo das tecnologias de combustão aplicadas na de produção de biodiesel.

Fontes: GREET1.7

Staat F., Vermeersch G., *Les esters méthyliques d'huile de colza comme carburants: bilan énergétique*, 1997

A terceira secção da folha *Biodiesel* está reservada para os cálculos de consumos e emissões de cada processo. São abrangidas a fase de plantação de colza, passando pelo transporte de grãos de colza para as instalações de produção de biodiesel e culminando nas fases de extracção de óleo e transesterificação.

Na plantação de colza são consideradas as utilizações de maquinaria, fertilizantes, herbicidas e insecticidas com todas as implicações a nível dos consumos e emissões que acarretam das folhas anteriores.



Relativamente ao recurso de processos mecanizados, podem-se observar os pesos que os combustíveis detêm no consumo final da produção agrícola e extracção de óleo.

Combustível	Plantação de colza
Gasóleo	77%
Gasolina	18%
Electricidade	5%

Tabela 31. Peso relativo dos combustíveis utilizados na produção agrícola.

Fontes: GREET1.7

Staat F., Vermeersch G., Les esters méthyliques d'huile de colza comme carburants: bilan énergétique, 1997

Ainda em relação à fase de produção agrícola de grãos de colza é considerado um dispêndio energético total de 4,024 MJ por unidade de massa (kg) de colza plantada (Staat F., Vermeersch G., 1997). Tendo em conta o valor de produtividade de grãos de colza da Tabela 29 obtém-se um valor total de consumo energético de 5,514 MJ/kg_{grão}. Considerando os valores que constam na Tabela 31, obtém-se os seguintes consumos de combustível.

Combustível	Consumo energético (kJ/kg _{grão})
Gasóleo	4246
Gasolina	992,5
Electricidade	275,7

Tabela 32. Consumos energéticos por combustível na fase de produção agrícola.

A utilização de fertilizantes e diferentes tipos de pesticidas comporta igualmente consumos energéticos e emissões decorrentes da sua produção, sendo o seu peso variável conforme as quantidades empregues. As dosagens (g/kg_{colza}) de fertilizantes, herbicidas e insecticidas consideradas no modelo podem ser observadas na próxima tabela.

Químico agrícola	Dosagem (g/kg _{colza})
Azoto	117,6
P ₂ O ₅	35,3
K ₂ O	70,6
Herbicidas	25
Insecticidas	10

Tabela 33. Dosagem de fertilizantes, herbicidas e insecticidas.

Fonte: Staat F., Vermeersch G., Les esters méthyliques d'huile de colza comme carburants: bilan énergétique, 1997



Depois das fases de produção e extracção de grãos de colza é realizada a etapa de extracção de óleo. Esta é efectuada através de trituração dos grãos em instalações industriais. Nesta fase, de acordo com as taxas de produtividade de óleo e biodiesel expressas na Tabela 29 e os valores obtidos por Staat e Vermeersch (Staat F., Vermeersch G., 1997) consideram-se os seguintes consumos de combustíveis (kJ/kg_{biodiesel}).

Combustível	Extracção de óleo (kJ/kg _{biodiesel})
Gás natural	2441
Electricidade	928,9
Hexano	59,5

Tabela 34. Consumo de combustíveis no processo de extracção de óleo.

Fonte: Staat F., Vermeersch G., *Les esters méthyliques d'huile de colza comme carburants: bilan énergétique*, 1997

No caso do processo de transesterificação, os consumos de combustíveis pode ser observados na tabela seguinte (kJ/kg_{biodiesel}).

Combustível	Transesterificação (kJ/kg _{biodiesel})
Gás natural	1993
Electricidade	1062
Metanol	3689
Hidróxido de sódio	100
Metóxido de sódio	488,4
Ácido sulfúrico	148,9

Tabela 35. Consumo de combustíveis no processo de transesterificação.

Fontes: *Biodiesel from rapeseed oil and used frying oil in European Union, Utrecht 2002-2003*
Staat F., Vermeersch G., *Les esters méthyliques d'huile de colza comme carburants: bilan énergétique*, 1997

Na quarta e última secção da folha *Biodiesel* é apresentado o resumo dos consumos e emissões globais de cada fase da produção de biodiesel. Estes são calculados tendo como base os valores apresentados nas secções anteriores desta folha e nas folhas *Transportes* e *Petróleo*.



5.1.11. Veículos

Na folha veículos são calculados os consumos e emissões gasosas associadas ao funcionamento dos veículos a simular. Os resultados dos cálculos efectuados nesta folha são fornecidos em função dos dados introduzidos pelo utilizador na secção 2 da folha *Dados de entrada*. Os dados em causa são a velocidade média da simulação e o teor de biodiesel no combustível.

Os veículos considerados no MACVC representam uma boa aproximação do parque automóvel existente em Portugal englobando todos os principais tipos de veículos em circulação. Os tipos de veículos considerados são os seguintes:

- Veículos ligeiros de passageiros a gasolina
- Veículos ligeiros de passageiros a gasóleo
- Veículos ligeiros de mercadorias a gasóleo
- Veículos pesados de passageiros turísticos
- Veículos pesados de passageiros urbanos
- Veículos pesados de mercadorias até 7,5t
- Veículos pesados de mercadorias 7,5t até 12t
- Veículos pesados de mercadorias 12t até 14t
- Veículos pesados de mercadorias mais de 14t

Os consumos de combustível dos veículos dependem de uma série de factores, sendo os mais importantes a cilindrada dos motores e a velocidade média da viagem. Em relação à cilindrada foi considerada uma gama média dentro da qual os valores de consumo não apresentam diferenças muito relevantes e que abrange uma parte significativa dos veículos em circulação. No caso dos veículos ligeiros as cilindradas situadas no intervalo entre 1,4l e 2,0l abrangem uma parte significativa dos veículos em circulação em Portugal. No caso dos veículos pesados, este factor deixa de ser tão importante pois estes encontram-se divididos em categorias de peso dentro das quais as cilindradas não apresentam diferenças significativas.

Veículos ligeiros de passageiros a gasolina

Os veículos ligeiros de passageiros a gasolina representam uma grande fatia dos veículos em circulação em Portugal, sendo por essa razão importante a sua inclusão no modelo. Estes veículos são sujeitos às normas Euro desde 1992 com a inclusão da norma Euro 1, sendo desde então sujeitos a normas cada vez mais rigorosas a níveis e emissões gasosas e de consumos. A norma Euro 2 entrou em vigor em 1996, seguida pela norma Euro 3 em 2000 e mais recentemente a norma Euro 4 em 2005. Antes da implementação das normas Euro, estes veículos eram regulamentados, desde 1972 pela norma ECE R15 (*Economic Committee for Europe Regulation 15*). Seguidamente é apresentado um resumo das normas aplicadas a veículos ligeiros de passageiros a gasolina:



- Pré ECE – até 1971
- ECE 15 00 e 01 – 1972 até 1977
- ECE 15 02 – 1978 até 1980
- ECE 15 03 – 1981 até 1985
- ECE 15 04 – 1985 até 1992
- Euro 1 – 1992 até 1996
- Euro 2 – 1996 até 2000
- Euro 3 – 2000 até 2005
- Euro 4 – a partir de 2005

Para os cálculos relativos aos veículos ligeiros de passageiros movidos a gasolina foi utilizada a expressão matemática apresentada a seguir (*Emission Inventory Guidebook, 2007*):

$$EF = \frac{(a + c \times V + e \times V^2)}{(1 + b \times V + d \times V^2)} \quad (1)$$

Em que, V representa a velocidade média (km/h) das viagens. Os restantes factores (a , b , c , d e e) podem ser consultados na tabela constante nos anexos do documento (anexo 5).

Veículos ligeiros de passageiros a gasóleo

Os veículos ligeiros de passageiros movidos a gasóleo são outro grupo com grande peso no total de veículos em circulação. Embora sejam em menor número que os veículos a gasolina apresentam um grande crescimento em termos de vendas.

Veículos a gasóleo de produção anterior a 1992 são englobados na categoria “convencionais”. Esta categoria inclui veículos não regulados anteriores a 1985 e veículos abrangidos pela directiva ECE 15/04 até 1992, os veículos desta classe são equipados com motores de injeção indirecta.

A partir de 1992, estes veículos passaram a ser regulados pelas normas Euro. Os veículos Euro 1 (1992 – 1996) foram os primeiros a ser regulamentados em relação às emissões dos quatro principais gases poluentes, CO, VOC, NOx e Partículas. Com a implementação da norma Euro 2 foram impostas reduções de emissões de 68% de CO, 38% de VOC e NOx e de 55% de partículas em relação aos modelos Euro1. Além das reduções de emissões foi imposta a instalação de catalizadores de oxidação em grande parte dos veículos. Para os veículos Euro 3 (2000) foram propostas reduções de 40%, 60%, 14% e 37.5% para as emissões de CO, NOx, VOC e partículas respectivamente. Estas reduções significativas de emissões deverem-se em grande parte à recirculação de gases de escape (reduzindo as emissões de NOx), o aperfeiçoamento dos sistemas de injeção de combustível e a implementação de filtros de partículas. Com a norma Euro 4, em 2005, foram introduzidas reduções de 22% nas emissões de CO e 50% nas emissões dos



restantes poluentes. As normas Euro 5 e Euro 6 foram recentemente propostas e, no caso dos veículos a gasóleo propõem reduções das emissões de NO_x na ordem de 28% e de 68% respectivamente para Euro 5 e 6. Contudo, a redução mais importante é a de emissões de partículas que pode chegar a 88% em relação à actual norma Euro 4.

Em relação aos factores de emissão e consumo de combustível, para os veículos anteriores à norma Euro, portanto veículos convencionais, estes são calculados de acordo com as equações que constam na tabela do anexo 6. Estas equações permitem calcular os factores de emissão e consumo em função da velocidade média da viagem.

No caso de veículos produzidos a partir da norma Euro 1, os factores de emissões e consumo de combustível são calculados por intermédio da próxima equação:

$$EF = \frac{(a + c \times V + e \times V^2)}{(1 + b \times V + d \times V^2)} + \frac{f}{V} \quad (2)$$

Mais uma vez, V representa a velocidade média (km/h) da viagem, os restantes factores da equação (a , b , c , d , e e f) podem ser obtidos no Anexo 7.

Veículos ligeiros de mercadorias a gasóleo

Os veículos ligeiros de mercadorias a gasóleo são abrangidos pelas mesmas regulamentações dos veículos ligeiros de passageiros e os raciocínios a seguir para o cálculo de consumos e emissões é semelhante. As equações a seguir para o caso de veículos convencionais e Euro 1 estão apresentadas no Anexo 7. Para as restantes normas são apresentadas as percentagens de reduções de emissões e consumos no Anexo 7.

Veículos pesados de passageiros e mercadorias

Os valores para os factores de emissões relativos a veículos pesados movidos a gasóleo foram obtidos através dos resultados fornecidos pelo *Emission Inventory Guidebook*, e pelo projecto *Artemis*. Estes documentos são igualmente usados como base para os cálculos efectuados no software COPERT. Devido à grande quantidade de informação contida, os dados de base para os cálculos dos factores de emissão e consumo de combustível encontram-se disponíveis nos Anexos 7 a Anexo 7. Nestes anexos são expostas as equações utilizadas para o cálculo dos respectivos factores e os valores para as incógnitas. Os factores abrangidos são, à semelhança dos restantes veículos, relativos às emissões de CO, VOC, NO_x, PM e consumo de combustível.



De modo geral, as equações usadas para o cálculo dos variados factores de emissão e consumo (Anexo 7 a Anexo 7) são as seguintes (*Emission Inventory Guidebook, 2007*):

$$EF = (a + b \times V) + \frac{((c - b) \times 1 - \exp(-d \times V))}{d} \quad (3)$$

$$EF = (e + (a \times \exp(-b \times V))) + (c \times \exp(-d \times V)) \quad (4)$$

$$EF = \frac{1}{(c \times V^2 + b \times V + a)} \quad (5)$$

$$EF = \frac{1}{(a + (b \times V^c))} \quad (6)$$

$$EF = \frac{1}{(a + (b \times V))} \quad (7)$$

$$EF = a - (b \times \exp(-c \times V^d)) \quad (8)$$

$$EF = a + \left(\frac{b}{(1 + \exp(-c + d \times \ln(V)) + e \times V)} \right) \quad (9)$$

$$EF = c + (a \times \exp(-b \times V)) \quad (10)$$

$$EF = c + (a \times \exp(b \times V)) \quad (11)$$

$$EF = \exp\left(a + \frac{b}{V}\right) + c \times \ln(V) \quad (12)$$

5.1.12. Resultados

Na folha *Resultados* são expostos os resultados obtidos dos cálculos efectuados nas folhas anteriores para os dados introduzidos pelo utilizador. É nesta folha que o utilizador pode ter acesso aos valores obtidos nas análises “poço à bomba” e “poço às rodas” efectuados no modelo.

Esta folha é dedicada exclusivamente à apresentação de resultados finais, não havendo qualquer introdução de dados por parte do utilizador. Os resultados das folhas anteriores são agora tratados como dados de entrada para os cálculos efectuados. Esta folha é constituída por duas secções onde são efectuadas as análises do “poço à bomba” e do “poço às rodas”.

Na primeira secção são contabilizados todos os consumos e emissões associados às fases de produção e transporte dos diversos combustíveis até



ao ponto em que são disponibilizados nos pontos de abastecimento. Os valores aqui apresentados são expressos em relação à energia contida nos combustíveis.

Os combustíveis considerados na folha Resultados são a gasolina, o gasóleo e o biodiesel. No caso do biodiesel são consideradas para além o biodiesel puro (B100) várias misturas entre este e o gasóleo, desde a mistura B10 até à B90. Embora a energia eléctrica não seja considerada como um combustível no modelo, é ainda assim incluída nesta folha principalmente para fins de comparação com os combustíveis automóveis.

Para cada combustível é são somados os valores de consumos e emissões calculados nas respectivas folhas dedicadas à sua produção com os valores calculados na folha *Transportes* para o transporte desses mesmos combustíveis. No caso das misturas de biodiesel e gasóleo os resultados são obtidos pela soma dos valores finais para o gasóleo e biodiesel de acordo com o peso de cada combustível na mistura.

Na segunda secção da folha, dedicada à análise do “poço às rodas”, são considerados para além dos consumos e emissões associados aos combustíveis consumidos mas também os associados ao funcionamento dos veículos a simular. Através dos factores de consumo e emissões dos veículos calculados na folha *Veículos* e das propriedades dos combustíveis (massa volúmica e PCI) que constam na folha *Dados dos combustíveis*, são calculados os consumos e emissões dos veículos em relação à energia fornecida pelo combustível.

5.1.13. Gráficos

A folha *Gráficos* é a última folha apresentada no MACVC e nela são apresentados gráficos que ajudam a interpretar os resultados obtidos na folha *Resultados*. A folha é composta por três tipos de gráficos:

- Gráficos de comparação de consumos energéticos e emissões associados à produção e transporte de combustíveis.
- Gráficos de comparação dos pesos da produção/transporte de combustível e o funcionamento dos veículos nos consumos e emissões globais da análise do “poço às rodas”.
- Gráficos de comparação de emissões entre veículos com diferentes combustíveis.

Os dados que servem de base para os gráficos apresentados nesta folha são provenientes das análises do “poço à bomba” e “poço às rodas” efectuadas na folha resultados.



Capítulo 6. Aplicação prática do MACVC

Neste capítulo será apresentado um caso prático de aplicação do MACVC com os respectivos resultados obtidos para as análises de ciclo de vida (“poço à bomba” e “poço as rodas”) do biodiesel e misturas deste com gasóleo.

O caso de estudo será baseado no trabalho de final de curso, Implementação Tecnológica de Biodiesel numa Frota de Autocarros, realizado pelos alunos André Quinta Nova e Luís Sampaio do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro no ano lectivo 2006/2007. No trabalho em causa foi realizada uma análise da viabilidade da implementação de biodiesel na frota de autocarros dos Transportes Urbanos de Braga (TUB).

O estudo baseou-se nas linhas 24 e 34 dos TUB e serão utilizados os mesmos dados de forma a poder comparar os resultados obtidos na altura por André Quinta Nova e Luís Sampaio com os obtidos no estudo actual com o MACVC.

6.1. Pressupostos do caso de estudo

Com este caso de estudo irá ser efectuada a análise de ciclo de vida do biodiesel numa frota de autocarros urbanos. Será considerado um cenário de controlo no qual o combustível utilizado pelos veículos alvo será o gasóleo, que é o combustível convencionalmente utilizado. Os cenários alternativos serão referentes à utilização de veículos mais recentes e biodiesel B100 bem como dois tipos de mistura com gasóleo (B30 e B50).

Relativamente aos veículos a simular foram considerados os seguintes dados referentes veículos que em 2005 realizavam os percursos das linhas 24 e 34.

Linha	Ano	Norma	Marca	Distância anual (km)	Consumo anual (l)
24	1996	Euro II	Mercedes	315531	142101
	1996	Euro II	Mercedes		
	1996	Euro II	Mercedes		
	1996	Euro II	Mercedes		
34	1982	Convencional	Iveco	17520	8376,31
	1982	Convencional	Iveco		
	1982	Convencional	Iveco		

Tabela 36. Dados dos veículos a simular.

Fonte: Implementação Tecnológica de Biodiesel numa Frota de Autocarros, 2007



Relativamente às velocidades médias praticadas nos percursos foram considerados os seguintes valores.

Linha	Velocidade média (km/h)
24	17
34	21

Tabela 37. Velocidades médias dos percursos.

Fonte: Implementação Tecnológica de Biodiesel numa Frota de Autocarros, 2007

É ainda importante referir que a linha 24 é composta por um percurso inteiramente urbano e plano enquanto que a linha 34 é um percurso misto (60% urbano e 40%rural) e acidentado (*Implementação Tecnológica de Biodiesel numa Frota de Autocarros, 2007*).

6.2. Resultados e discussão

Nesta secção será, em primeiro lugar, efectuada a comparação dos consumos calculados através do MACVC com os consumos reais verificados para as linhas em questão. Essa comparação será efectuada para o cenário padrão das linhas 24 e 34 dos TUB e para dois cenários alternativos onde serão alterados os veículos (para veículos mais recentes) e a taxa de ocupação. Os valores de consumo tomados como base são os considerados por André Quinta Nova e Luís Sampaio em *Implementação Tecnológica de Biodiesel numa Frota de Autocarros, 2007*. Seguidamente, ainda em relação às linhas 24 e 34, serão calculadas as emissões gasosas associadas ao funcionamento dos veículos durante os seus trajectos para os vários cenários considerados.

Por fim será efectuada a análise de ciclo de vida do gasóleo e biodiesel. Nesta análise serão considerados os consumos energéticos e emissões gasosas decorrentes das diversas etapas da vida dos combustíveis desde a sua produção à sua combustão. Ainda em relação à análise de ciclo de vida dos combustíveis serão analisados potenciais impactos destes para o meio ambiente e saúde humana.

Linha 24

Relativamente à linha 24, no **cenário base** foi efectuada a simulação com autocarros abrangidos pela norma Euro II com uma velocidade média de 17 km/h e uma ocupação de 50%.

Alternativamente, no **cenário 1** foi considerada a utilização de um veículo mais recente, abrangido pela norma Euro IV (em vigor desde 2005) obtiveram-se os seguintes resultados. No **cenário 2** foi considerado um veículo igual ao utilizado no cenário 1, mas agora com uma taxa de ocupação de 100%.



Os resultados obtidos no MACVC para o consumo de gasóleo expressos em toneladas podem ser observados na próxima tabela.

Linha	Cenário base	Cenário 1	Cenário 2
34	118,4	117,1	129,4

Tabela 38. Resultados obtidos no MACVC para consumo de gasóleo da linha 24.

Nos mesmos cenários, André Quinta Nova e Luís Sampaio obtiveram através dos dados fornecidos pelos TUB os seguintes resultados para o consumo anual.

Cenário	Consumo anual estatístico (t)
Base	118,7
1	107,8
2	118,7

Tabela 39. Consumo de gasóleo fornecido pelos TUB.

Fonte: Implementação Tecnológica de Biodiesel numa Frota de Autocarros, 2007

Comparando os valores obtidos no MACVC com os valores obtidos através do Copert e com os valores estatísticos fornecidos pelos TUB, obtêm-se as seguintes variações.

Cenário	Consumo anual MACVC (t)	Consumo anual estatístico (t)	Variação (%)
Base	118,4	118,7	0,2
1	117,1	107,8	8,7
2	129,4	118,7	9,1

Tabela 40. Comparação dos consumos de gasóleo calculados no MACVC com os consumos estatísticos fornecidos pelos TUB para a linha 24.

O resultado obtidos para o cenário base revela uma grande proximidade com o valor real de consumo de combustível, neste cenário a variação em relação ao valor real é praticamente nula (apenas 0,2%). Para os cenários alternativos as taxas de variação são maiores embora ainda sejam inferiores a 10% (8,7% para o cenário 1 e 9,1% para o cenário 2).



Relativamente às emissões gasosas, no cenário base foram obtidos os seguintes resultados com o MACVC.

Gás	Emissões (g/km)	Emissões anuais (t)
CO	3,48	1,10
NO _x	13,52	4,27
PM10	2,29	0,09
CO ₂	1177	371,4

Tabela 41. Resultados obtidos no MACVC para emissões gasosa da linha 24 no cenário base.

Relativamente ao cenário 1, os resultados são os seguintes.

Gás	Emissões (g/km)	Emissões anuais (t)
CO	0,31	0,1
NO _x	7,15	2,26
PM10	0,07	0,02
CO ₂	1164	367,5

Tabela 42. Resultados obtidos no MACVC para emissões gasosa da linha 24 no cenário 1.

Já no caso do cenário 2 os resultados obtidos foram os seguintes.

Gás	Emissões (g/km)	Emissões anuais (t)
CO	3,92	1,24
NO _x	14,65	4,62
PM10	0,32	0,10
CO ₂	1287	406,03

Tabela 43. Resultados obtidos no MACVC para emissões gasosa da linha 24 no cenário 2.

Linha 34

Relativamente à linha 34, no **cenário base** foi efectuada a simulação com autocarros convencionais com uma velocidade média de 21 km/h e uma ocupação de 50%.

No **cenário 1** foi considerada a utilização de um autocarro abrangido pela norma Euro II, nas condições referidas anteriormente e no **cenário 2** foi considerado um veículo igual ao cenário base mas com uma taxa de ocupação de 100%.



Os resultados obtidos no MACVC para o consumo de gasóleo anual de gasóleo em toneladas podem ser observados na próxima tabela.

Linha	Cenário base	Cenário 1	Cenário 2
34	14,5	13,2	16,6

Tabela 44. Resultados obtidos no MACVC para consumo de gasóleo da linha 34.

Comparando os resultados pode-se observar o seguinte.

Cenário	Consumo anual MACVC (t)	Consumo anual Estatístico (t)	Variação (%)
Base	14,5	20,1	-28
1	13,2	16,3	-19
2	16,6	19,3	-14

Tabela 45. Comparação dos consumos de gasóleo calculados no MACVC com os consumos estatísticos fornecidos pelos TUB para a linha 34.

Relativamente às emissões gasosas obtiveram-se os seguintes resultados expressos em toneladas com o MACVC.

Gás	Cenário base (g/km)	Cenário 1 (g/km)	Cenário 2 (g/km)
CO	6,69	2,92	7,29
NO _x	18,4	12,1	20,2
PM10	1,07	0,25	1,15
CO ₂	1297	1049	1395

Tabela 46. Resultados obtidos no MACVC para emissões gasosas da linha 34.

Comparando os resultados obtidos para a linha 34 verifica-se que há um desfasamento significativo entre os valores obtidos através do MACVC e os valores fornecidos pelos TUB. As maiores variações entre os resultados obtidos e os valores reais foram obtidas no cenário base (cerca de 28%), diminuindo depois nos cenários alternativos 1 e 2. No entanto, estas continuam a ser muito elevadas (14% e 19%). O facto de o percurso efectuado na linha 34 ser um misto de percurso urbano e rural com grandes variações topográficas tornam-no mais difícil de simular. Para este tipo de simulações mais complexas o MACVC revela-se incapaz de fornecer resultados credíveis.



6.2.2. Análise de ciclo de vida do biodiesel

Nesta secção será efectuada a análise do ciclo de vida do biodiesel aplicado à linha 24 dos TUB. Os pressupostos considerados no estudo são os mesmos que foram considerados na secção anterior para a linha 24.

Para efectuar o estudo pretendido é necessário em primeiro lugar introduzir os dados de partida para o modelo efectuar a simulação, esses são introduzidos na folha *Dados de entrada* do MACVC. Aqui foram considerados três cenários:

- **Cenário 1** - Velocidade média da viagem a simular: 17 km/h
- Percentagem de biodiesel na mistura combustível: 100%
- **Cenário 2** - Velocidade média da viagem a simular: 17 km/h
- Percentagem de biodiesel na mistura combustível: 50%
- **Cenário 3** - Velocidade média da viagem a simular: 17 km/h
- Percentagem de biodiesel na mistura combustível: 30%

Seguidamente serão abordadas as folhas relativas aos processos produtivos associados ao ciclo de vida dos combustíveis. Esses processos são transversais aos três cenários considerados pois, independentemente das misturas de biodiesel consideradas, os processos aplicados à produção dos combustíveis são os mesmos.

Relativamente à **extracção de petróleo e produção de combustíveis** seus derivados foram consideradas as condições impostas pela base de dados do MACVC, que por sua vez é baseada na base de dados do GREET1.7. Estes dados dizem respeito a processos produtivos cujos procedimentos pouco variam à escala mundial. Para do facto referido anteriormente, os dados tidos como base para a folha *Petróleo* estão numa base percentual podendo-se aplicar a qualquer capacidade produtiva.



O MACVC fornece os seguintes valores para os consumos energéticos de cada processo relacionado com a produção de combustíveis derivados do petróleo ($\text{J/kWh}_{\text{produzido}}$).

	Extracção Petróleo	Refinamento Fuel óleo	Produção Gasóleo	Produção Gasolina	Produção GPL
Crude	734,7	0	0	0	0
Fuel óleo	734,7	5.684,2	13.348,3	19.058,8	7.508
Gasóleo	11.020,4	0	0	0	0
Gasolina	1.469,3	0	0	0	0
Gás natural	45.477,6	56.842,1	133.483,2	190.588,2	75.080,2
Carvão	0	24.631,6	57.842,7	82.588,2	32.534,8
Electricidade	13.959,2	7.578,9	17.797,8	25.411,8	10.010,7
Gases de processo	0	94.736,8	222.471,9	317.647,1	125.133,7

Tabela 47. Consumos energéticos de cada processo individual por combustível ($\text{J/kWh}_{\text{produzido}}$).

Considerando a energia necessária para a produção dos combustíveis utilizados nos processos acima mencionados obtêm-se os seguintes valores globais de consumo energético ($\text{kJ/kWh}_{\text{produzido}}$).

	Extracção Petróleo	Refinamento Fuel óleo	Produção Gasóleo	Produção Gasolina	Produção GPL
Energia total	67,29	149,7	149,7	147,2	246,9
Combustíveis fósseis	67,09	149,6	149,6	147,2	233,9
Carvão	14,82	5,626	5,626	4,917	8,204
Gás natural	36,75	63,11	63,11	62,28	92,19
Petróleo	15,52	80,87	80,87	80,02	133,5

Tabela 48. Consumo total de energia de cada processo de produção de combustíveis ($\text{kJ/kWh}_{\text{produzido}}$).

Relativamente às emissões gasosas decorrentes da produção de combustíveis obtêm-se o seguinte ($\text{g/kWh}_{\text{produzido}}$).

Gás	Extracção Petróleo	Refinamento Fuel óleo	Produção Gasóleo	Produção Gasolina	Produção GPL
VOC	0,002	0,003	0,008	0,011	0,004
CO	0,015	0,028	0,066	0,095	0,037
NO _x	0,039	0,093	0,218	0,311	0,123
PM10	0,003	0,002	0,005	0,007	0,003
PM2,5	0,002	0,002	0,003	0,005	0,002
SO _x	0,005	0,004	0,010	0,014	0,006
CH ₄	0,019	0,037	0,088	0,125	0,049
N ₂ O	0,019	0,001	0,003	0,004	0,002
CO ₂	10,76	11,11	26,10	37,27	14,68

Tabela 49. Emissões decorrentes dos processos de extracção e produção de combustíveis ($\text{g/kWh}_{\text{produzido}}$).



Na folha *Transportes* são considerados todos os meios de transporte envolvidos no **transporte de matérias primas e combustíveis** envolvidos na produção de biodiesel.

No caso do crude utilizado nas refinarias nacionais situadas no Porto e em Sines tem origem principalmente em países da bacia do Mediterrâneo, da África Ocidental, do Golfo Pérsico e das Américas (Galp).

Origem do crude	Distância (km)
Américas	9414
Golfo Pérsico	8127
Mediterrâneo	4615

Tabela 50. Origem do crude utilizado nas refinarias de Sines e Porto.

Fontes: *Implementação Tecnológica de Biodiesel numa Frota de Autocarros, 2007*
Galp Energia

No presente caso foi considerado que este é importado directamente de países da bacia do Mediterrâneo tendo para isso que percorrer uma distância de 4615 km através de navios petroleiros.

Os combustíveis são posteriormente transportados para os postos de abastecimento e instalações de produção de biodiesel (gasóleo), sendo para este estudo considerada uma viagem de 30 km até Braga. Este valor foi considerado tendo como base o valor considerado André Quinta Nova e Luís Sampaio (*Implementação Tecnológica de Biodiesel numa Frota de Autocarros, 2007*). Em relação ao biodiesel foi considerado proveniente da empresa SPACE sediada em Vila Nova de Famalicão a uma distância de 14,3 km.

Os resultados relativos ao transporte de combustíveis para as fases produtivas e distribuição obtidos da folha *Transportes* podem ser observados nas próximas tabelas.

	Crude	Fuel óleo	Gasóleo	Gasolina	Biodiesel
Energia total	23,8	25,7	186,8	175,9	219,7
Combustíveis fósseis	23,8	25,7	186,8	175,9	219,7
Carvão	0	0	0	0	0
Gás natural	0	0	0	0	0
Petróleo	23,8	25,7	186,8	175,9	219,7

Tabela 51. Consumos globais de energia para transporte de combustíveis (J/kWh_{transportado}).



	Gasóleo	Gasolina	Biodiesel
Energia total	233,3	219,8	219,7
Combustíveis fósseis	233,3	219,8	219,7
Carvão	0	0	0
Gás natural	0	0	0
Petróleo	233,3	219,8	219,7

Tabela 52. Consumos globais de energia para distribuição de combustíveis (J/kWh_{transportado}).

Gás	Crude	Fuel óleo	Gasóleo	Gasolina
VOC	0,28	0,30	0,09	0,01
CO	1,03	1,12	0,32	0,07
NOx	7,26	7,86	1,78	0,26
PM10	0,22	0,23	0,04	0,01
PM2,5	0,16	0,17	0,03	0,01
SOx	4,24	4,59	0,35	0,01
CH ₄	0,08	0,08	0,08	0,07
N ₂ O	0,02	0,03	0,02	0,02
CO ₂	94,7	102,5	118,7	32,3

Tabela 53. Emissões gasosas globais para transporte de combustíveis (g/kWh_{transportado}).

Gás	Gasóleo	Gasolina	Biodiesel
VOC	0,09	0,01	0,01
CO	0,30	0,06	0,06
NOx	1,55	0,20	0,20
PM10	0,03	0,01	0,01
PM2,5	0,03	0,004	0,004
SOx	0,04	0,01	0,01
CH ₄	0,10	0,09	0,09
N ₂ O	0,03	0,02	0,02
CO ₂	140,7	29,2	29,2

Tabela 54. Emissões gasosas globais para distribuição de combustíveis (g/kWh_{transportado}).

A **energia eléctrica** é, como se pode ver na Tabela 47, fundamental para a produção dos combustíveis derivados de petróleo uma vez que é uma das principais fontes energéticas dos vários processos envolvidos. No caso da produção de biodiesel através de transesterificação a electricidade é igualmente fundamental.

Em Portugal a produção eléctrica é caracterizada pelos valores da Tabela 25 que constam na base de dados do MACVC na folha *Electricidade*. Dessa tabela verifica-se que as centrais térmicas são as principais fornecedoras de energia eléctrica. Nessas centrais são queimados principalmente combustíveis fósseis nas proporções reveladas na Tabela 22 igualmente contidos na base de dados do MACVC. Relativamente à



distribuição eléctrica efectuada pela REN (Rede Eléctrica Nacional) são consideradas perdas de 9% (IEA, 2005).

Tendo então em consideração a base de dados do MACVC para a realidade da produção eléctrica em Portugal obtêm-se os seguintes relativos a consumos energéticos.

Combustível	Consumo energético (kJ/kWh _{distribuída})
Energia total	1150
Combustíveis fósseis	1101
Carvão	378,4
Gás natural	468,2
Petróleo	254,5

Tabela 55. Consumo energético global da produção eléctrica em Portugal.

Em relação às emissões gasosas verificam-se os seguintes resultados.

Gás	Emissões globais (g/kWh _{distribuída})
VOC	0,02
CO	0,51
NO _x	1,19
PM ₁₀	0,58
PM _{2,5}	0,32
SO _x	1,14
CH ₄	0,04
N ₂ O	0,45
CO ₂	931,4

Tabela 56. Emissões globais associadas à produção eléctrica em Portugal.

Relativamente à **produção de Biodiesel**, será considerado que a produção é efectuada através da transesterificação de óleo de colza uma vez que é neste processo em que o MACVC se baseia. A produção de biodiesel é composta por três etapas principais: produção agrícola de colza, extracção de óleo e produção de biodiesel por transesterificação.

Considerando os dados contidos na base de dados do MACVC para as diversas fases da produção de biodiesel apresentados na secção 5.3.10 deste trabalho foram calculados os consumos energéticos e emissões decorrentes da produção de biodiesel.



Para a fase de produção agrícola de colza, recorrendo aos valores das Tabela 29 aTabela 32 obtêm-se os seguintes resultados para consumos energéticos.

	Proc. mecanizados (kJ/kg_{grão})	Total (kJ/kg_{grão})
Energia total	5643	6284
Combustíveis fósseis	5639	6280
Carvão	58,9	97,6
Gás natural	181,3	371,7
Petróleo	5398	5810

Tabela 57. Consumos energéticos totais (kJ/kg_{grão}) na produção agrícola de colza.

Relativamente às emissões, verificam-se os seguintes resultados expressos em g/kg_{grão}.

Gás	Proc. mecanizados (g/kg_{grão})	Total (g/kg_{grão})
VOC	0,29	0,91
CO	1,55	2,26
NO _x	3,01	3,68
PM10	0,30	0,49
PM2,5	0,25	0,39
SO _x	0,14	2,84
CH ₄	0,08	0,37
N ₂ O	1,69	3,06
CO ₂	414,5	689,0

Tabela 58. Emissões gasosas totais (g/kg_{grão}) na produção agrícola de colza.

Relativamente à extracção de óleo, esta é realizada basicamente através da trituração dos grãos de colza seguida de filtração do óleo bruto. De acordo com os valores da Tabela 34 são obtidos os seguintes resultados para os consumos energéticos.

	Extracção de óleo (kJ/kg_{BD})
Energia total	2977
Combustíveis fósseis	2837
Carvão	104,8
Gás natural	154,8
Petróleo	2577

Tabela 59. Consumos energéticos totais (kJ/kg_{BD}) na extracção de óleo de colza.



Relativamente às emissões gasosas decorrentes da extracção de óleo dos grãos de colza verificam-se os seguintes resultados.

Gás	Extracção de óleo (g/kg_{BD})
VOC	0,02
CO	0,22
NO _x	0,44
PM10	0,16
PM2,5	0,09
SO _x	0,33
CH ₄	0,47
N ₂ O	0,15
CO ₂	399,6

Tabela 60. Emissões gasosas totais (g/kg_{BD}) na extracção de óleo de colza.

Na fase de produção de biodiesel através de transesterificação, considerando os valores expressos na Tabela 35 obtêm-se os seguintes resultados para os consumos energéticos.

	Transesterificação (kJ/kg_{BD})
Energia total	9273
Combustíveis fósseis	9155
Carvão	2484
Gás natural	1857
Petróleo	4813

Tabela 61. Consumos energéticos totais (kJ/kg_{BD}) na transesterificação.

Da observação da Tabela 35 facilmente se verifica que a utilização de metanol como matéria prima para a reacção de transesterificação do óleo de colza representa a principal fatia do consumo energético associado a esta etapa produtiva.



Relativamente às emissões gasosas podem-se observar os seguintes resultados.

Gás	Transesterificação (g/kg_{BD})
VOC	0,02
CO	0,22
NO _x	0,46
PM10	0,18
PM2,5	0,10
SO _x	0,36
CH ₄	0,38
N ₂ O	0,17
CO ₂	407,6

Tabela 62. Emissões gasosas totais (g/kg_{BD}) na transesterificação.

Globalmente os consumos energéticos e as emissões gasosas são expressos em relação à energia contida no biodiesel produzido (kJ/kWh e g/kWh respectivamente). Na tabela apresentada de seguida são expressos os consumos energéticos associados às fases de produção agrícola, transporte de combustível (óleo vegetal e biodiesel) e produção industrial (extração de óleo e transesterificação).

	Prod. agrícola (kJ/kWh)	Prod. industrial (kJ/kWh)	Transportes (kJ/kWh)
Energia total	145,1	85,30	13,32
Combustíveis fósseis	145,1	83,43	13,32
Carvão	2,25	17,86	0
Gás natural	8,58	13,85	0
Petróleo	134,2	51,73	13,32

Tabela 63. Consumos energéticos totais (kJ/kWh) na produção de biodiesel.



Em termos percentuais, o peso de cada fase no consumo global de energia para produção de biodiesel pode ser observado no seguinte gráfico.

Distribuição do consumo energético na produção de biodiesel

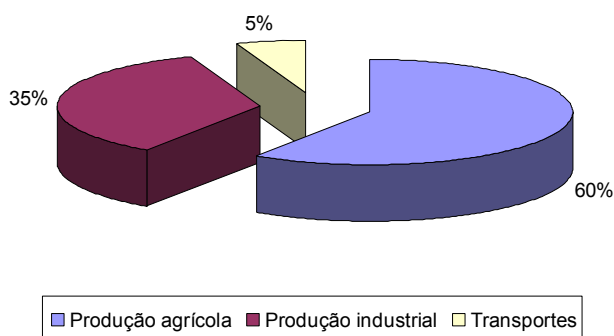


Figura 37. Distribuição do consumo energético na produção de biodiesel.

Para se realizar a análise de ciclo de vida do biodiesel é agora necessário proceder à contabilização dos consumos energéticos e emissões decorrentes do **funcionamento dos veículos**. Os consumos e emissões decorrentes da utilização de gasóleo nos veículos da linha 24 já foram determinados na secção anterior (6.0.1.). Na tabela seguinte será apresentado o resumo do consumo e emissões dos veículos considerados na secção 6.1.1. para a linha 24.

Veículo	Consumo (g/km)
Euro II	375,19
Euro IV	371,17

Tabela 64. Consumo de gasóleo dos veículos considerados na linha 24.

Gás	Euro II (g/km)	Euro IV (g/km)
CO	3,48	0,31
NO _x	13,52	7,15
PM10	2,29	0,07
CO ₂	1177,2	1164,6

Tabela 65. Emissões gasosas dos veículos considerados na linha 24 movidos a gasóleo.

Relativamente ao consumo de combustível considera-se que a aplicação de biodiesel não provoca alterações significativas dos consumos verificados com gasóleo. Esta consideração deve-se às semelhanças verificadas entre as propriedades dos combustíveis tanto a densidade como o poder calorífico são semelhantes (no caso do PCI, verifica-se uma variação de 8% em favor do gasóleo).



No caso das emissões, segundo os valores obtidos através da *National Biodiesel Board*, com a utilização de biodiesel (B100, B50 e B30) verificam-se as seguintes variações de emissões.

Gás	B100	B50	B30
CO	-48,1%	-27,9%	-17,9%
NO _x	10,3%	5,0%	2,9%
PM10	-47,2%	-27,3%	-17,4%
CO ₂	-1,85%	0%	0%

Tabela 66. Variações de emissões gasosas mediante uso de biodiesel.

Fonte: <http://www.Biodiesel.org>

Santos D. C., Peixoto L. B., Torres E. A., *Análise de Emissões e de Consumo Específico de um Motor Diesel Operando com Biodiesel de Soja e de Óleos e Gorduras Residuais*

Assim sendo, aplicando os factores de variação de emissões aos veículos estudados obtêm-se os resultados apresentados nas próximas tabelas.

Gás	B100 (g/km)	B50 (g/km)	B30 (g/km)
CO	1,81	2,51	2,86
NO _x	14,91	14,19	13,92
PM10	0,67	0,21	0,24
CO ₂	1155,4	1177,2	1177,2

Tabela 67. Emissões gasosas do autocarro Euro II com B100, B50 e B30.

Gás	B100 (g/km)	B50 (g/km)	B30 (g/km)
CO	0,16	0,23	0,26
NO _x	7,89	7,51	7,37
PM10	0,04	0,05	0,05
CO ₂	1143,0	1164,6	1164,6

Tabela 68. Emissões gasosas do autocarro Euro IV com B100, B50 e B30.

De um modo geral a aplicação de biodiesel permite reduções significativas (até 48%) nos valores de emissões gasosas para a atmosfera. Outra vantagem do biodiesel relacionada com as emissões decorrentes da sua combustão prende-se com o facto de não ser emitido enxofre (SO₂).



Seguidamente serão apresentados os gráficos onde são comparadas as emissões de cada gás para cada um dos veículos testados (Euro II e Euro IV).

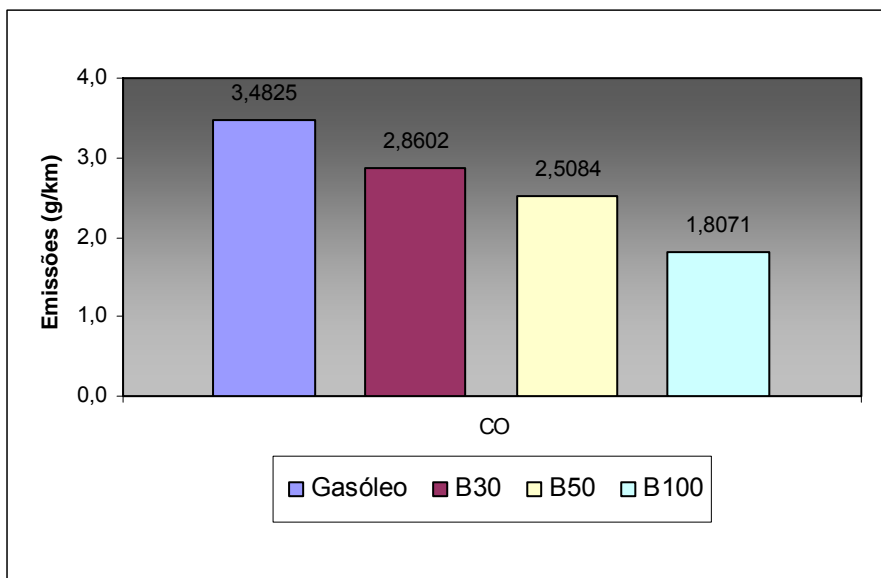


Figura 38. Comparação de emissões de CO com cada combustível aplicado ao veículo Euro II.

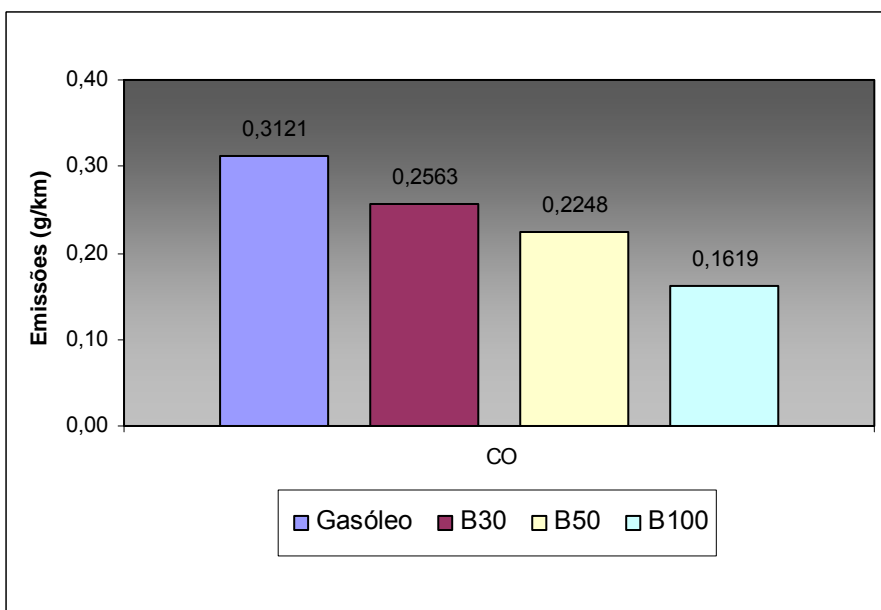


Figura 39. Comparação de emissões de CO com cada combustível aplicado ao veículo Euro IV.

Ao nível do CO, verifica-se que independentemente do veículo estudado as emissões deste gás sofrem diminuições significativas com a utilização de biodiesel. Estas diminuições são maiores quanto maior for o teor em biodiesel no combustível variando entre 18% para o BD30 e 48% para BD100.

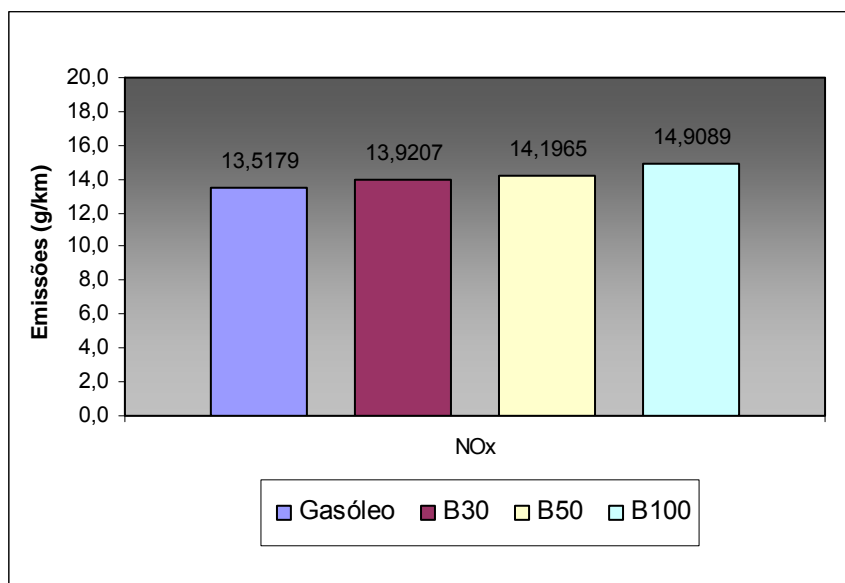


Figura 40. Comparação de emissões de NOx com cada combustível aplicado ao veículo Euro II.

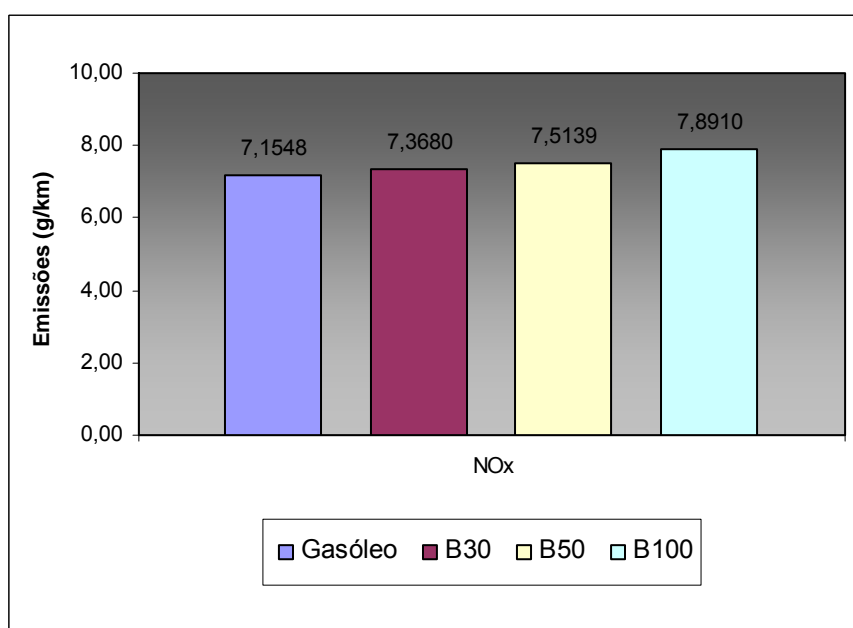


Figura 41. Comparação de emissões de NOx com cada combustível aplicado ao veículo Euro IV.

Comparando os valores das emissões de NOx verifica-se que estas, ao contrário do que acontece para as restantes emissões, tendem a aumentar com a utilização de biodiesel. O valor do aumento verificado nas emissões de NOx varia entre 3% para o BD30 e 10% para o BD100.

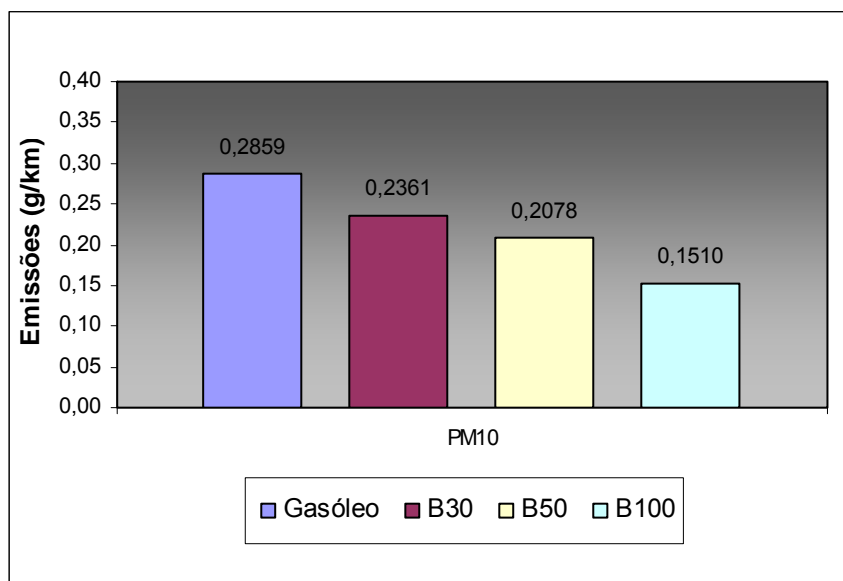


Figura 42. Comparação de emissões de PM10 com cada combustível aplicado ao veículo Euro II.

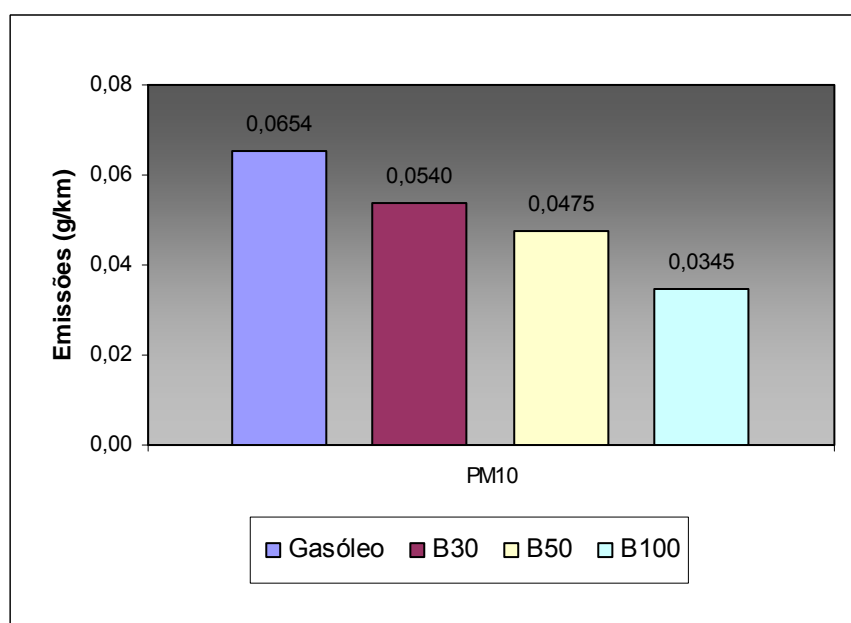


Figura 43. Comparação de emissões de PM10 com cada combustível aplicado ao veículo Euro IV.

No caso das emissões de partículas (PM) verifica-se novamente uma tendência de redução dos valores, sendo esta mais significativa quanto maior for o conteúdo de biodiesel no combustível. As reduções das emissões de partículas variam entre 17%, 27% e 47% dependendo se é utilizado BD30, BD50 ou BD100 respectivamente.

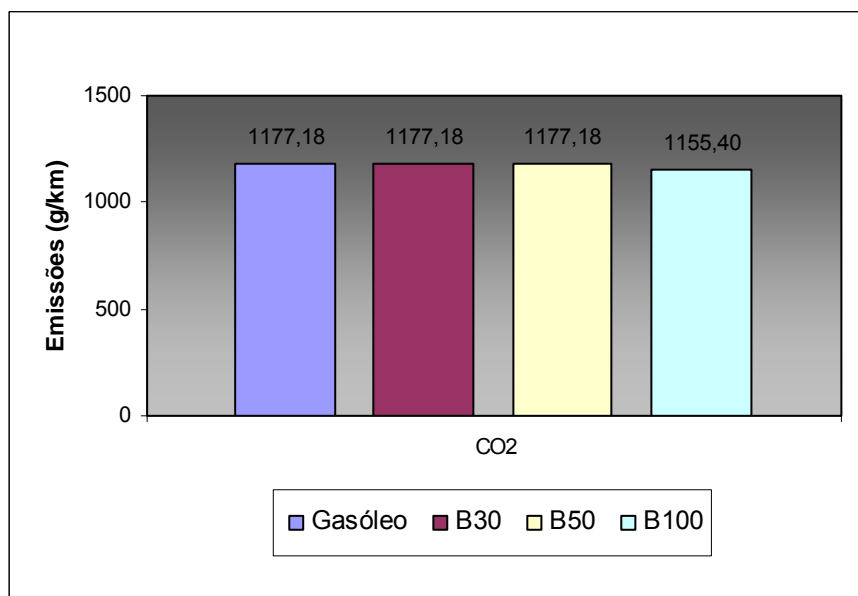


Figura 44. Comparação de emissões de CO₂ com cada combustível aplicado ao veículo Euro II.

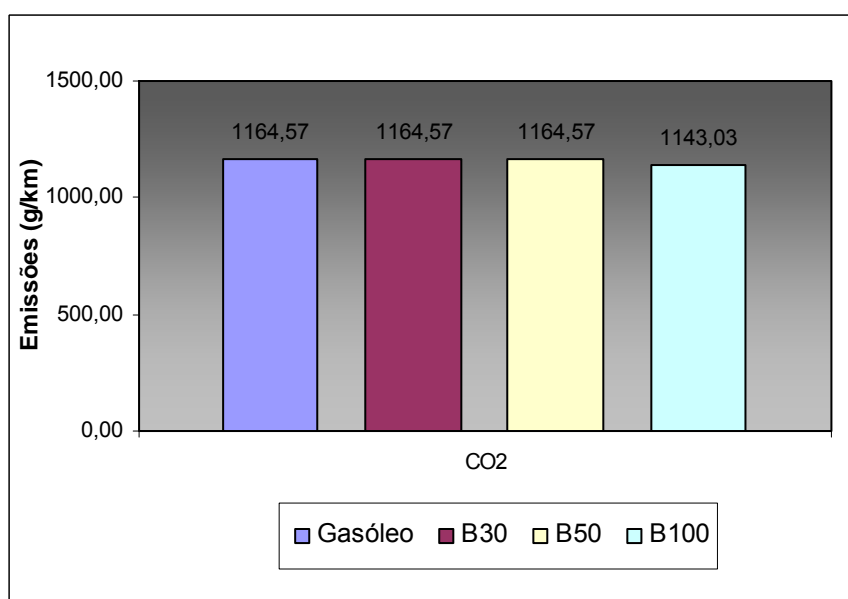


Figura 45. Comparação de emissões de CO₂ com cada combustível aplicado ao veículo Euro IV.

No caso das emissões de CO₂ não são verificadas reduções significativas. A emissão de CO₂ é um processo natural associado a qualquer tipo de combustão independentemente do combustível a ser utilizado. De acordo com valores experimentais obtidos por Santos D. C., et al a redução de emissões de CO₂ resultante da utilização de biodiesel puro é de apenas 1,85%. Relativamente às misturas B50 e B30 são consideradas variações nulas de emissões de CO₂ em relação ao gasóleo.



Análise de “poço à bomba”

A análise de ciclo de vida do biodiesel é efectuada estudando não apenas os consumos e emissões individuais dos veículos mas considerando igualmente os contributos de cada fase da vida do combustível. Estas fases englobam todos os processos desde a extracção de petróleo até à combustão nos motores dos veículos passando pelo transporte de matérias primas, produção e distribuição dos combustíveis.

Seguidamente serão apresentados os gráficos resultantes da análise do “poço à bomba” efectuada através do MACVC.

No próximo gráfico (Figura 46) é apresentada a comparação entre os consumos totais de energia durante a produção e distribuição dos combustíveis considerados. Nesse gráfico é igualmente apresentado o consumo de combustíveis fósseis e dentro desse grupo quais as fontes fósseis utilizadas para a produção dos combustíveis.

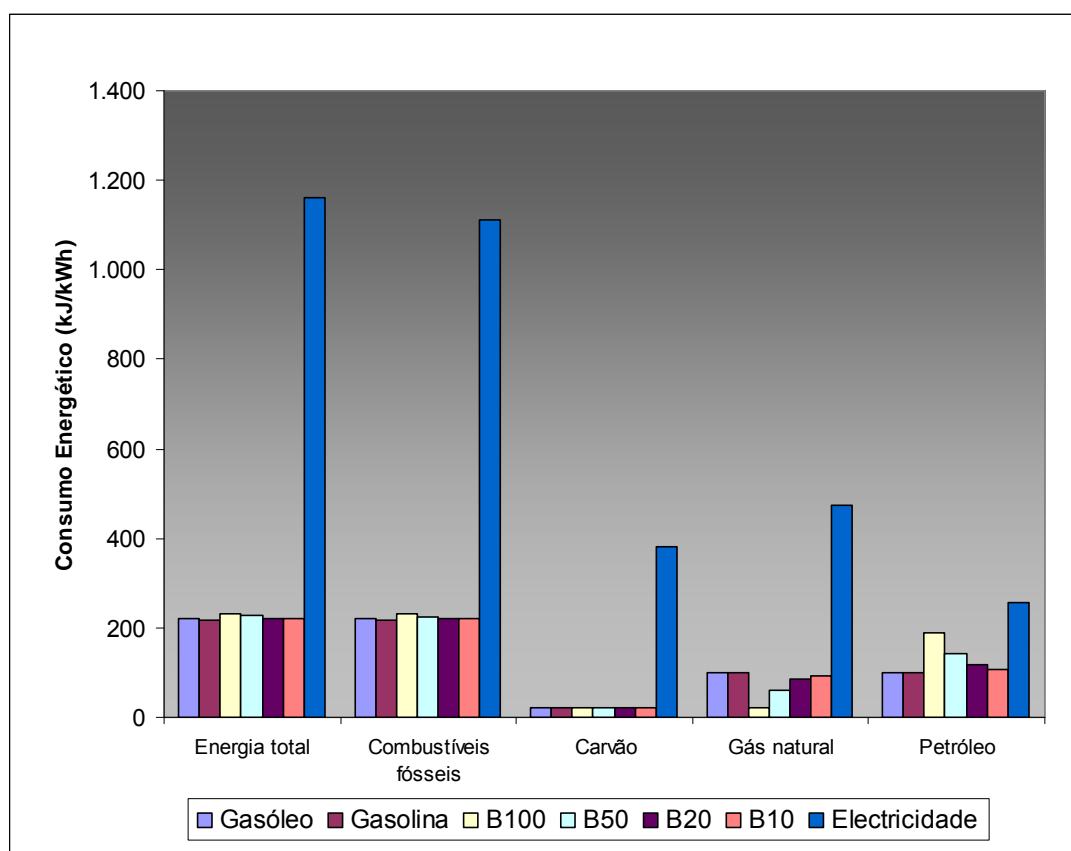


Figura 46. Gráfico comparativo dos consumos energéticos totais na produção e distribuição de combustíveis (poço à bomba).

Na Figura 46 é patente a grande diferença em termos de consumo de energia entre a produção de electricidade e a produção dos restantes combustíveis. Em Portugal a produção eléctrica é, ainda, fortemente dependente da queima de combustíveis fósseis em centrais térmicas (71% do



total de electricidade produzida) com baixas eficiências de conversão. Desta forma, o rácio entre energia consumida e energia eléctrica produzida é bastante elevado. Este facto tem um impacto decisivo na contabilização dos consumos energéticos dos ciclos de vida dos combustíveis em estudo. O maior consumo de electricidade na produção de biodiesel acarreta como consequência um maior consumo geral de energia em todo o seu ciclo de vida.

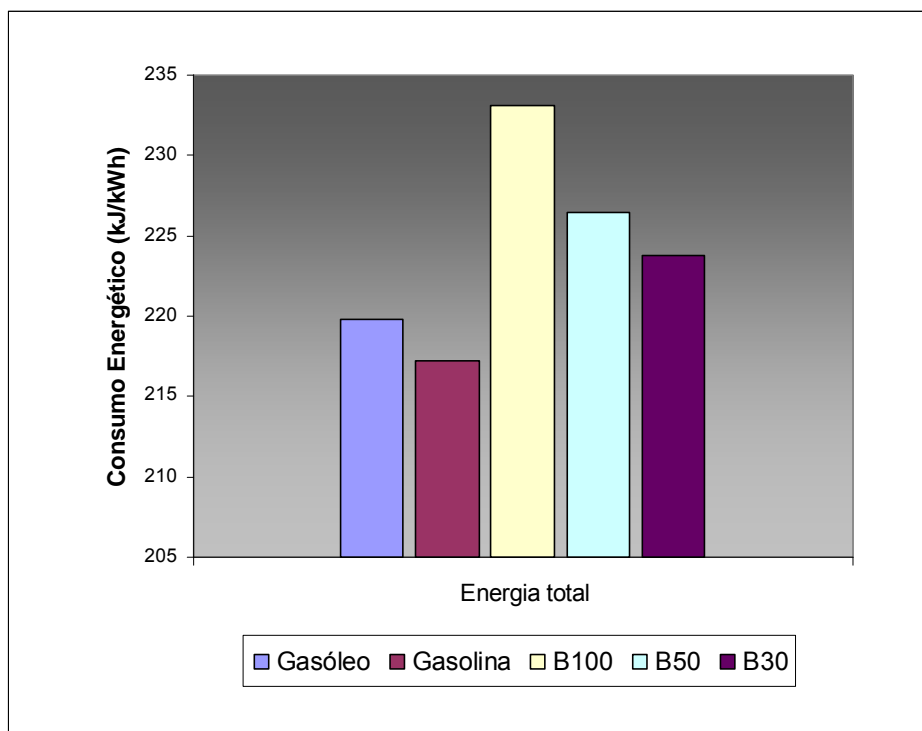


Figura 47. Gráfico comparativo dos consumos energéticos totais na produção e distribuição de gasóleo e biodiesel (poço à bomba).

Da observação das Figura 46 e Figura 47 verifica-se que a produção de biodiesel acarreta um consumo energético global mais elevado que o gasóleo. Igualmente importante é o facto de, apesar do biodiesel ser um combustível renovável, a produção recorre quase exclusivamente a combustíveis fósseis para suprir as necessidades energéticas. Dos combustíveis empregues na produção de biodiesel, os derivados do petróleo, mais precisamente o gasóleo são os maiores fornecedores de energia. Estes são consumidos principalmente na fase de produção agrícola para funcionamento de maquinaria.



Na tabela seguinte podem ser observados em maior detalhe os consumos energéticos do “poço à bomba” obtidos no MACVC para o gasóleo, biodiesel B100, B50 e B30.

	Gasóleo (kJ/kWh)	B100 (kJ/kWh)	B50 (kJ/kWh)	B30 (kJ/kWh)
Energia total	219,8	233,1	226,4	223,8
Comb. Fósseis	219,5	231,1	225,3	223,0
Carvão	20,45	20,11	20,28	20,35
Gás natural	99,86	22,43	61,14	76,63
Petróleo	99,19	188,6	143,9	126,0

Tabela 69. Consumos energéticos totais do “poço à bomba” do gasóleo e biodiesel.

No caso das emissões gasosas serão abordadas de forma individual as emissões dos gases considerados no modelo (compostos orgânicos voláteis (VOC), CO, NO_x, partículas (PM), SO_x, CH₄, N₂O e CO₂). Nos gráficos apresentados de seguida são comparadas as emissões decorrentes da produção do biodiesel e do gasóleo.

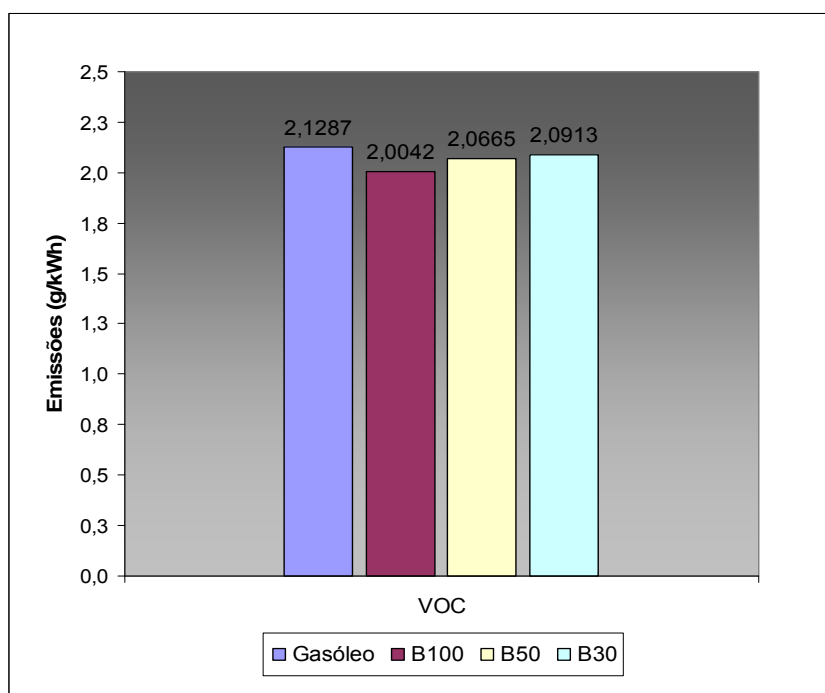


Figura 48. Gráfico comparativo das emissões de VOC totais na produção e distribuição de gasóleo e biodiesel (poço à bomba).

Da observação da Figura 48 verifica-se que a produção de biodiesel acarreta níveis de emissões de compostos orgânicos voláteis ligeiramente inferiores que o gasóleo. Os VOC são basicamente compostos por moléculas de carbono e os principais são aldeídos, cetonas e outros hidrocarbonetos leves resultantes da combustão incompleta dos combustíveis. A principal fonte de emissões de VOC reside na queima de combustíveis derivados de petróleo e gás natural.

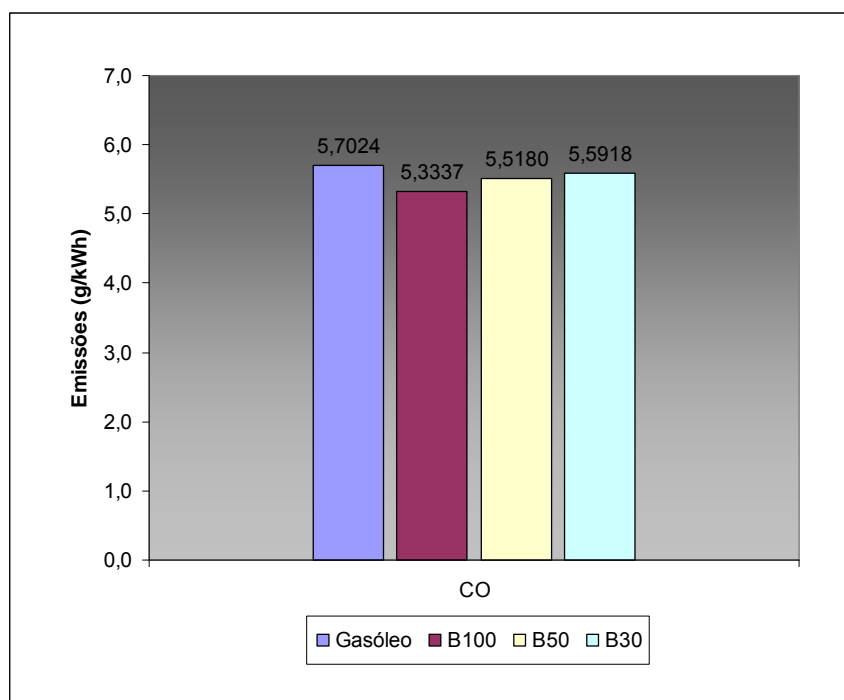


Figura 49. Gráfico comparativo das emissões de CO totais na produção e distribuição de gasóleo e biodiesel (poço à bomba).

Na Figura 49 verifica-se uma ligeira diminuição das emissões de CO na produção de biodiesel em comparação com a produção de gasóleo. Este gás é altamente tóxico e resulta da combustão incompleta de hidrocarbonetos como é o caso de qualquer combustível.

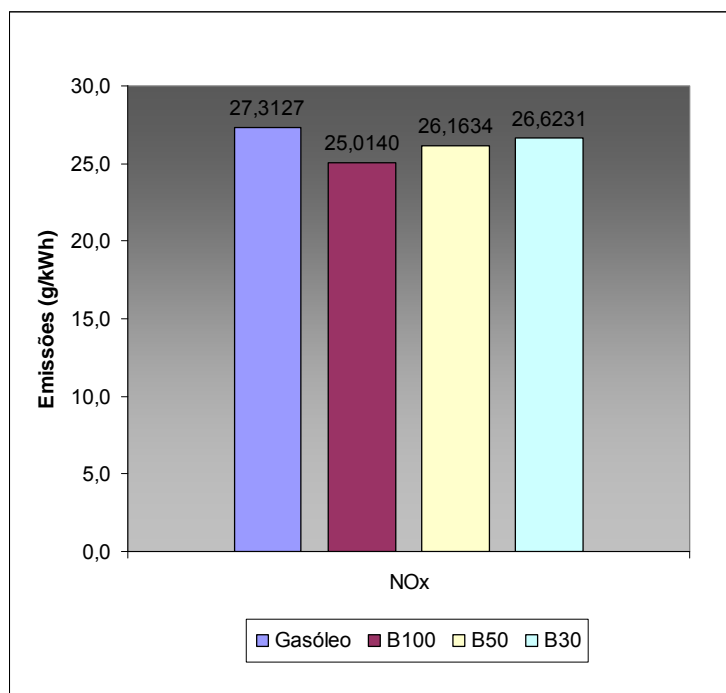


Figura 50. Gráfico comparativo das emissões de NOx totais na produção e distribuição de gasóleo e biodiesel (poço à bomba).

Na Figura 50 observa-se mais uma vez que as fases de produção e distribuição de biodiesel acarretam menores emissões de NOx para a atmosfera. Este gás tem como principais fontes a combustão a altas temperaturas principalmente de gás natural e a combustão de carvão que é um combustível com alto teor de azoto.

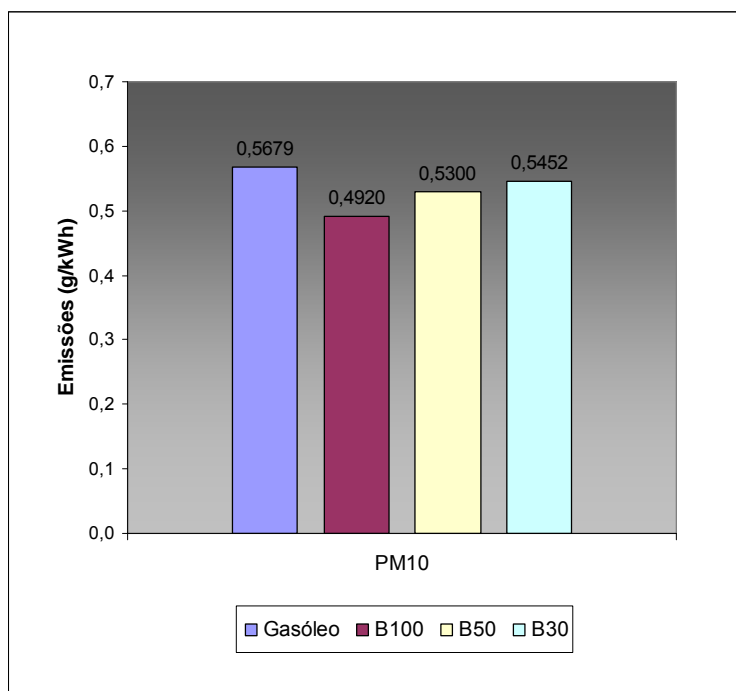


Figura 51. Gráfico comparativo das emissões de PM10 totais na produção e distribuição de gasóleo e biodiesel (poço à bomba).

Da observação da Figura 51 constata-se que a produção de biodiesel acarreta menores emissões de partículas que a produção de gasóleo. As emissões de partículas são mais relevantes principalmente na combustão de gasóleo e carvão.

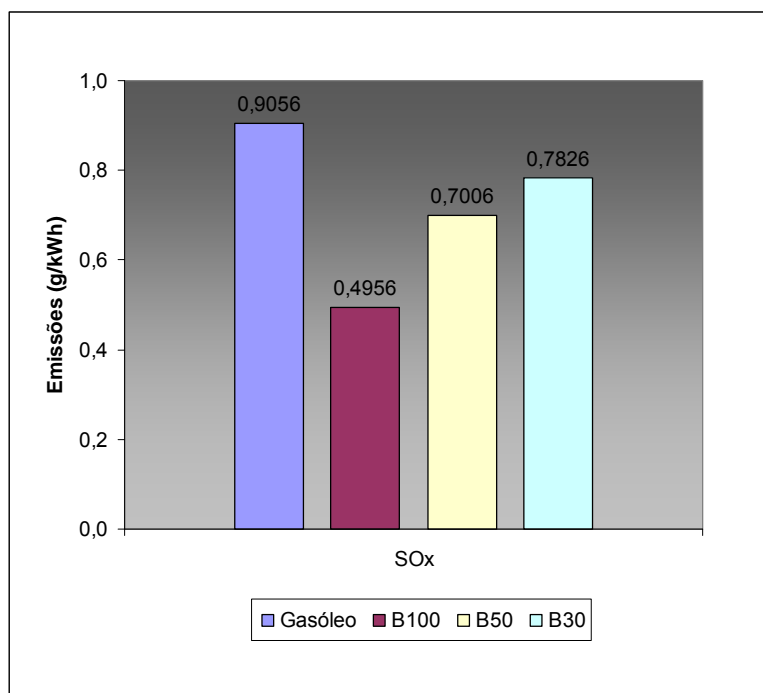


Figura 52. Gráfico comparativo das emissões de SOx totais na produção e distribuição de gasóleo e biodiesel (poço à bomba).

Na Figura 52 observa-se uma diferença significativa dos valores de emissões de SOx entre a produção de biodiesel e de gasóleo. As emissões deste gás têm como principais fontes a combustão de carvão e de derivados do petróleo principalmente fuel óleo que é o principal combustível utilizado no transporte marítimo de petróleo para as refinarias.

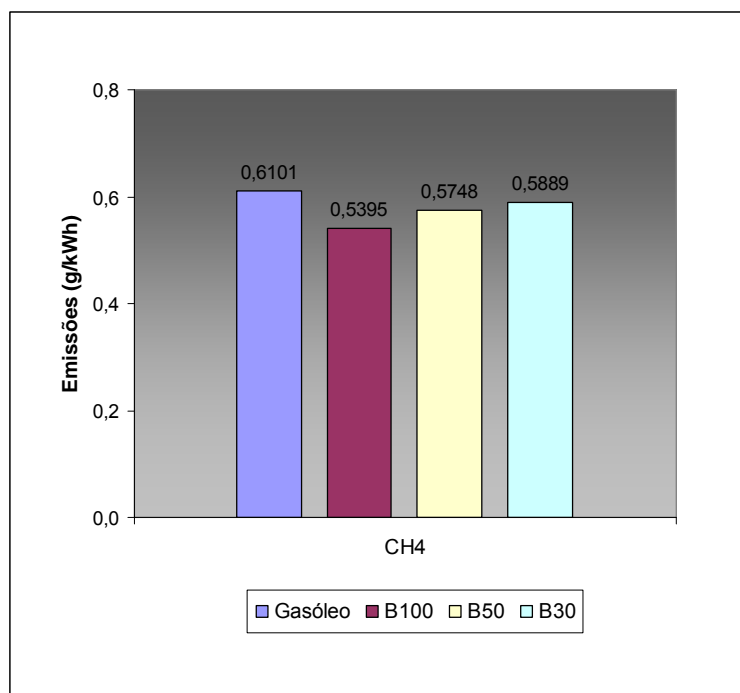


Figura 53. Gráfico comparativo das emissões de CH₄ totais na produção e distribuição de gasóleo e biodiesel (poço à bomba).

Da Figura 53 pode-se verificar que as emissões de metano durante as fases de produção e distribuição de biodiesel são inferiores às verificadas para o caso do gasóleo. As emissões de metano têm como principal fonte a combustão de gás natural, no caso do biodiesel as fases de produção industrial relativas à extracção de óleo e transesterificação são as que mais contribuem para este tipo de emissões.

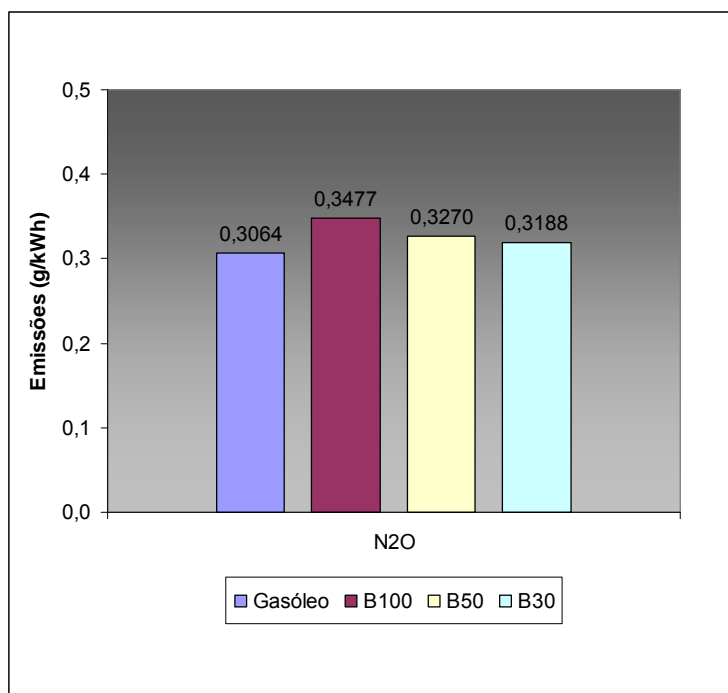


Figura 54. Gráfico comparativo das emissões de N_2O totais na produção e distribuição de gasóleo e biodiesel (poço à bomba).

Na Figura 54 observa-se que as fases produtivas de biodiesel acarretam emissões de N_2O mais elevadas que as fases de produção de gasóleo. As emissões deste gás têm como principais fontes a queima de combustíveis fósseis presente em todas as fases de produção dos combustíveis e, principalmente, a produção e utilização de químicos agrícolas contendo azoto. De facto a utilização de fertilizantes durante a fase de produção agrícola de colza aliada a processos naturais de produção de N_2O resultantes de actividade microbiana nos solos têm um importante papel nas emissões deste gás durante a produção de biodiesel.

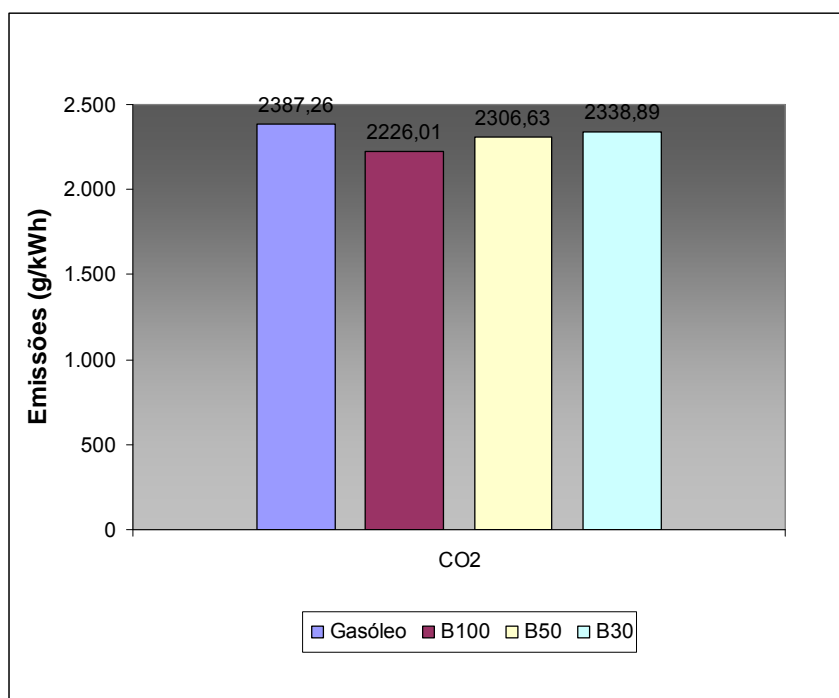


Figura 55. Gráfico comparativo das emissões de CO₂ totais na produção e distribuição de gasóleo e biodiesel (poço à bomba).

Da observação da Figura 55 verifica-se que a produção de biodiesel acarreta menores emissões de CO₂ que a produção de gasóleo. As emissões de CO₂ têm como grande fonte a queima de combustíveis independentemente da sua natureza. O carbono contido nos combustíveis na presença de oxigénio dá origem ao CO₂ libertado durante a combustão. No caso da produção de biodiesel as emissões de CO₂ são compensadas pela fixação deste durante a fotossíntese das plantas de colza.

Na próxima tabela é apresentado o resumo das emissões gasosas decorrentes das fases de produção e distribuição do gasóleo e do biodiesel (B100, B50 e B30). Estas correspondem às emissões do “poço à bomba” dos respectivos combustíveis.

Gás	Gasóleo (g/kWh)	B100 (g/kWh)	B50 (g/kWh)	B30 (g/kWh)
VOC	2,14	2,004	2,07	2,10
CO	5,75	5,33	5,54	5,62
NO _x	27,4	25,01	26,2	26,7
PM10	0,54	0,49	0,51	0,52
PM2,5	0,48	0,44	0,46	0,46
SO _x	0,93	0,49	0,71	0,80
CH ₄	0,61	0,54	0,58	0,59
N ₂ O	0,31	0,35	0,33	0,32
CO ₂	2368	2226	2297	2325

Tabela 70. Emissões gasosas totais do “poço à bomba” do gasóleo e biodiesel.



Análise de “poço às rodas”

A análise global do ciclo de vida dos combustíveis é denominada análise do “**poço às rodas**” e não é mais que o somatório dos consumos e emissões das fases de produção dos combustíveis e da sua combustão nos motores dos veículos.

Considerando os resultados obtidos nas Tabela 64 e Tabela 69 obtém-se os seguintes resultados em relação aos consumos energéticos totais no ciclo de vida do gasóleo e biodiesel expressos em kJ/km.

No caso da utilização de gasóleo nos autocarros abrangidos pela norma Euro II obtém-se os seguintes resultados.

	Total (kJ/km)	Prod. Gasóleo (kJ/km)	Comb. Veículo (kJ/km)
Energia total	16292	937,5	15355
Combustíveis fósseis	16291	936,2	15354
Carvão	87,21	87,21	
Gás natural	425,9	425,9	
Petróleo	15778	423,1	15355

Tabela 71. Consumos energéticos totais do “poço às rodas” associados à utilização de gasóleo em autocarros Euro II.

No caso dos autocarros Euro IV igualmente movidos a gasóleo obtém-se os seguintes resultados.

	Total (kJ/km)	Prod. Gasóleo (kJ/km)	Comb. Veículo (kJ/km)
Energia total	16118	927,45	15190
Combustíveis fósseis	16116	926,2	15190
Carvão	86,28	86,28	
Gás natural	421,4	421,4	
Petróleo	15609	418,5	15190

Tabela 72. Consumos energéticos totais do “poço às rodas” associados à utilização de gasóleo em autocarros Euro IV.

Numa primeira análise aos resultados expressos nas Tabela 71 e Tabela 72 pode-se verificar, como seria de esperar, que a utilização de veículos mais recentes permite reduzir os níveis de consumo energético globais. Esta poupança deve-se à maior eficiência dos veículos que permite a obtenção de menores consumos de gasóleo e, por conseguinte, menores consumos globais de energia associados à produção do gasóleo consumido. No total a utilização de veículos Euro IV em detrimento de veículos Euro II permite uma poupança de 174kJ por cada quilómetro percorrido pelo veículo.



Com a utilização de biodiesel para os mesmos veículos em funcionamento nas mesmas condições referidas anteriormente são obtidos os resultados apresentados nas próximas tabelas. Para o caso da utilização de biodiesel B100 em autocarros Euro II obtêm-se os seguintes resultados.

	Total (kJ/km)	Prod. Biodiesel (kJ/km)	Comb. Veículo (kJ/km)
Energia total	17820	1084	16737
Combustíveis fósseis	17811	1074	16737
Carvão	93,51	93,51	
Gás natural	104,3	104,27	
Petróleo	17613	876,6	16737

Tabela 73. Consumos energéticos totais do "poço às rodas" associados à utilização de biodiesel B100 em autocarros Euro II.

Já no caso de autocarros Euro IV obtiveram-se os seguintes resultados.

	Total (kJ/km)	Prod. Biodiesel (kJ/km)	Comb. Veículo (kJ/km)
Energia total	17629	1072	16557
Combustíveis fósseis	17620	1063	16557
Carvão	92,51	92,51	
Gás natural	103,2	103,2	
Petróleo	17425	867,2	16557

Tabela 74. Consumos energéticos totais do "poço às rodas" associados à utilização de biodiesel B100 em autocarros Euro IV.

No caso da utilização de biodiesel puro (B100) observa-se a mesma tendência verificada no caso do gasóleo em relação à utilização de veículos mais recentes. Comparando os resultados obtidos para os dois combustíveis é já possível concluir que a utilização de biodiesel puro acarreta no global consumos energéticos cerca de 9,5% mais elevados que o gasóleo. Este facto deve-se, para além do maior consumo verificado na fase de produção de biodiesel, a um consumo mais elevado na fase de utilização fruto do menor poder calorífico do biodiesel em relação ao gasóleo.



Seguidamente são expostos os resultados obtidos para as misturas de gasóleo e biodiesel (B50 e B30).

No caso da mistura B50 os resultados obtidos para os autocarros Euro II são os seguintes.

	Total (kJ/km)	Prod. Biodiesel (kJ/km)	Comb. Veículo (kJ/km)
Energia total	17011	965,8	16046
Combustíveis fósseis	17007	960,9	16046
Carvão	86,50	86,50	
Gás natural	260,8	260,8	
Petróleo	16659	613,6	16046

Tabela 75. Consumos energéticos totais do "poço às rodas" associados à utilização de biodiesel B50 em autocarros Euro II.

Com autocarros Euro IV movidos com biodiesel B50 obtêm-se os seguintes resultados.

	Total (kJ/km)	Prod. Biodiesel (kJ/km)	Comb. Veículo (kJ/km)
Energia total	16829	955,5	15874
Combustíveis fósseis	16824	950,6	15874
Carvão	85,58	85,58	
Gás natural	258,0	258,0	
Petróleo	16481	607,1	15874

Tabela 76. Consumos energéticos totais do "poço às rodas" associados à utilização de biodiesel B50 em autocarros Euro IV.

Mais uma vez verificam-se menores consumos energéticos associados à utilização de veículos mais recentes e eficientes. Devido ao conteúdo de gasóleo existente no combustível, verifica-se uma aproximação dos valores dos consumos energéticos em relação aos obtidos no gasóleo sendo neste caso a diferença reduzida para 4,5%.



Para a mistura B30 associada à utilização de autocarros Euro II os resultados foram os seguintes.

	Total (kJ/km)	Prod. Biodiesel (kJ/km)	Comb. Veículo (kJ/km)
Energia total	16724	954,5	15769
Combustíveis fósseis	16720	951,0	15769
Carvão	86,79	86,79	
Gás natural	326,8	326,8	
Petróleo	16307	537,4	15769

Tabela 77. Consumos energéticos totais do "poço às rodas" associados à utilização de biodiesel B30 em autocarros Euro II.

Utilizando a mesma mistura em autocarros Euro IV os resultados obtidos são os seguintes.

	Total (kJ/km)	Prod. Biodiesel (kJ/km)	Comb. Veículo (kJ/km)
Energia total	16545	944,3	15600
Combustíveis fósseis	16541	940,9	15600
Carvão	85,86	85,86	
Gás natural	323,3	323,3	
Petróleo	16132	531,7	15600

Tabela 78. Consumos energéticos totais do "poço às rodas" associados à utilização de biodiesel B30 em autocarros Euro IV.

Devido ao elevado conteúdo de gasóleo presente na mistura B30 (70% de gasóleo e 30% de biodiesel) verifica-se uma grande proximidade dos consumos de energia em relação aos verificados no caso do gasóleo sendo a diferença registada de apenas 3%.



Os impactos no meio ambiente e na saúde humana associados aos combustíveis podem ser determinados tendo como base as emissões gasosas que são libertadas para a atmosfera ao longo do ciclo de vida destes.

No caso das emissões de compostos orgânicos voláteis (VOC) as emissões totais do ciclo de vida do gasóleo e do biodiesel são expostas na próxima figura.

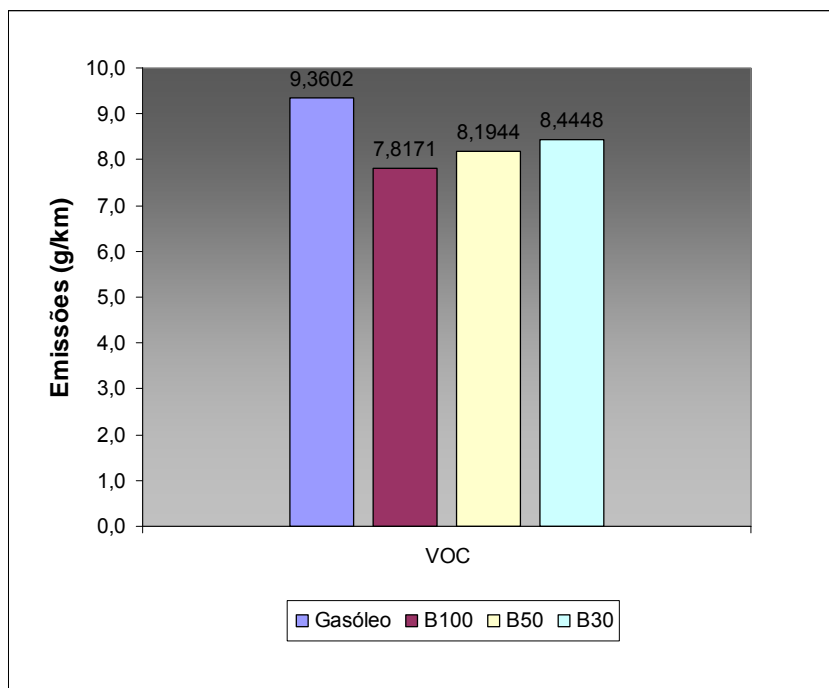


Figura 56. Gráfico comparativo das emissões de VOC totais no ciclo de vida do gasóleo e do biodiesel (poço às rodas).

A principal contribuição para as emissões de VOC reside nas etapas de produção dos combustíveis e, nestas, a produção de gasóleo apresenta maiores níveis de emissões. Quanto às emissões resultantes da queima dos combustíveis durante o funcionamento dos veículos, a presença de oxigénio no biodiesel permite uma melhor combustão e consequentemente menores emissões de VOC comparativamente com o gasóleo (redução de aproximadamente 10%).



Relativamente às emissões de monóxido de carbono (CO) os resultados são apresentados na próxima figura.

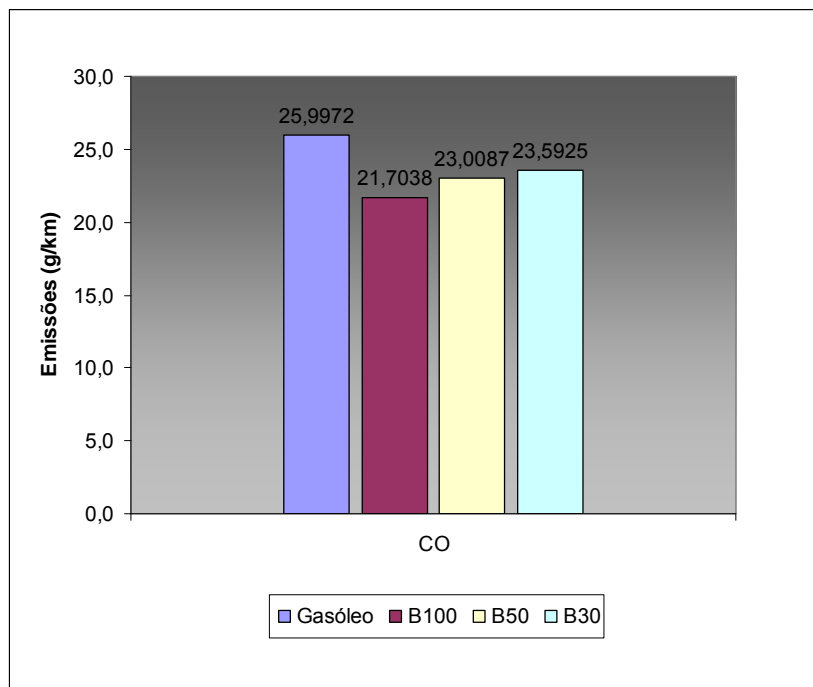


Figura 57. Gráfico comparativo das emissões de CO totais no ciclo de vida do gasóleo e do biodiesel (poço às rodas).

As emissões de CO têm como principal fonte a queima de combustíveis associada ao transporte de matérias e combustíveis e à sua utilização nos veículos em estudo. Nestas fases a utilização de biodiesel permite, como já foi referido anteriormente, grandes reduções neste tipo de emissões (cerca de 48% no caso de biodiesel puro).



No caso das emissões de óxidos de azoto (NO_x), os resultados relativos ciclos de vida do gasóleo e biodiesel podem ser vistos na figura apresentada de seguida.

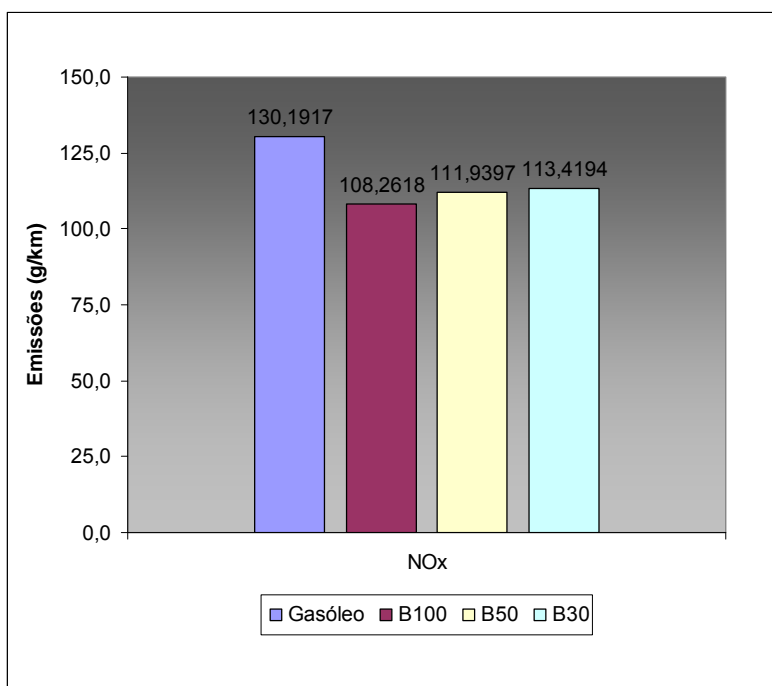


Figura 58. Gráfico comparativo das emissões de NO_x totais no ciclo de vida do gasóleo e do biodiesel (poço às rodas).

Como sucede nos casos dos VOC e CO, as emissões de NO_x apresentam valores totais mais baixos no ciclo de vida do biodiesel. Embora a combustão de biodiesel apresente valores mais elevados do que o gasóleo (ver Tabela 66 e Figura 40 e Figura 41) as etapas de produção de biodiesel apresentam valores mais baixos.

Os maiores níveis de emissões de NO_x resultantes da combustão do biodiesel podem ser explicados pela presença de oxigénio na sua estrutura química. Durante a combustão o oxigénio atmosférico e o contido no biodiesel reagem com o azoto libertando-se assim para a atmosfera óxidos de azoto.



As emissões de partículas (PM) são contabilizadas na próxima figura.

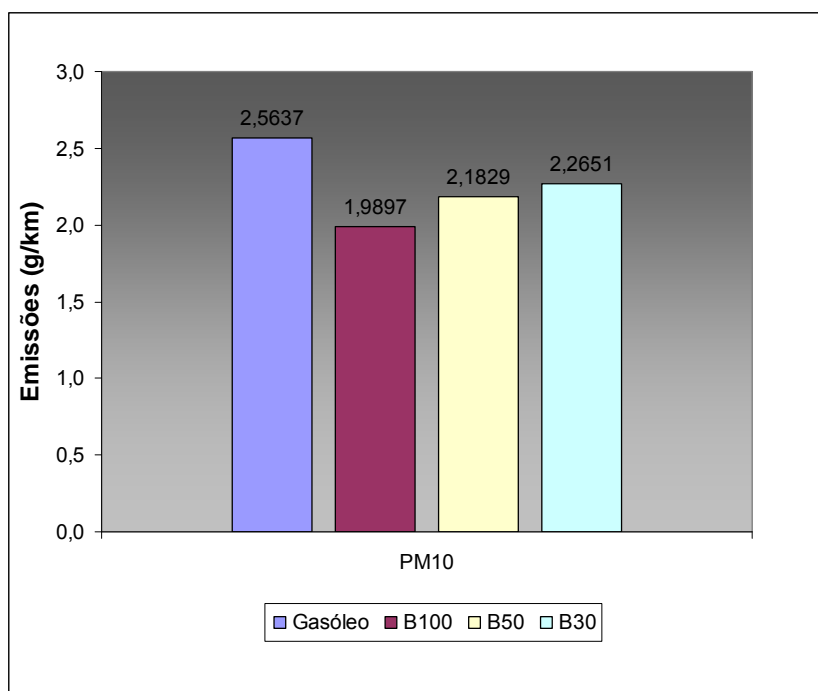


Figura 59. Gráfico comparativo das emissões de PM10 totais no ciclo de vida do gasóleo e do biodiesel (poço às rodas).

Da observação da Figura 59 é possível verificar que o biodiesel ao longo do seu ciclo de vida apresenta menores emissões de partículas que o gasóleo. As emissões de partículas têm como principal fonte a combustão incompleta de combustíveis durante as fases de transportes e utilização final. O conteúdo de oxigénio presente no biodiesel permite uma melhor combustão e consequentemente reduções nos níveis de partículas não queimadas emitidas para a atmosfera.



Relativamente às emissões de óxidos de enxofre (SOx) são obtidos os resultados apresentados na seguinte figura.

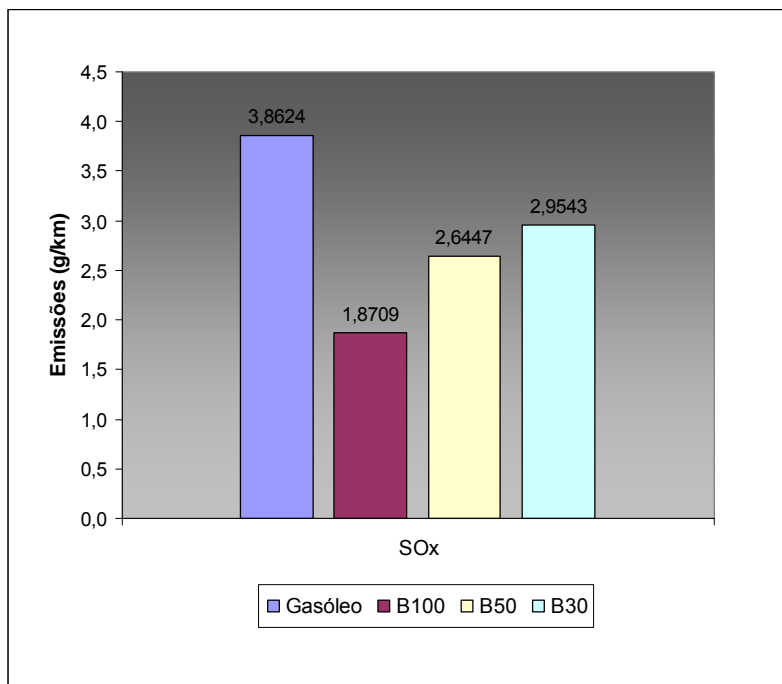


Figura 60. Gráfico comparativo das emissões de SOx totais no ciclo de vida do gasóleo e do biodiesel (poço às rodas).

Através da observação da Figura 60 é visível a grande diferença verificada entre as emissões de óxidos de enxofre (SOx) nos ciclos de vida do biodiesel e do gasóleo. As emissões deste gás têm como principal origem os processos de queima de combustíveis fósseis (principalmente crude e fuel óleo) associados ao refinamento de petróleo e seus derivados. A redução verificada nas emissões de SOx contribui para a diminuição da acidificação da atmosfera.



Para as emissões gasosas de metano (CH_4) são obtidos os resultados apresentados na figura mostrada de seguida.

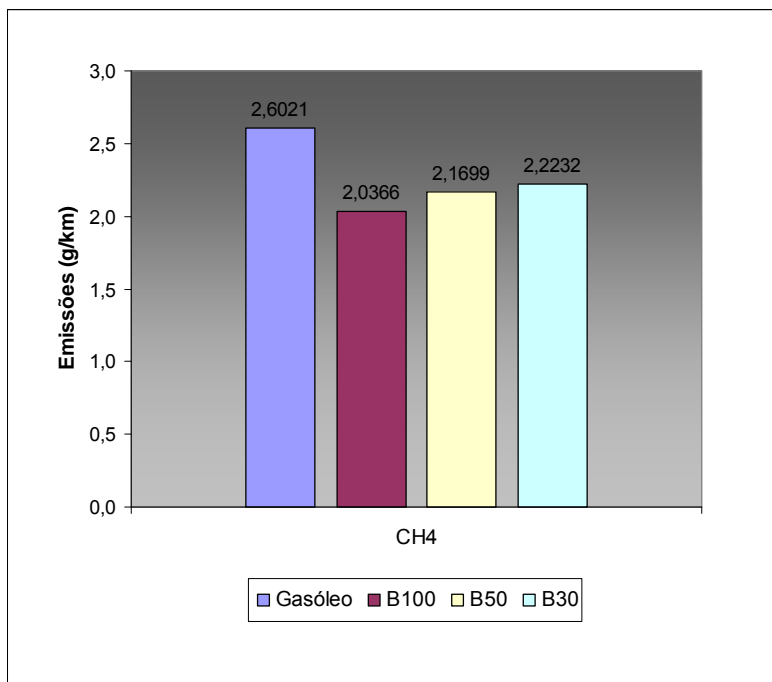


Figura 61. Gráfico comparativo das emissões de CH_4 totais no ciclo de vida do gasóleo e do biodiesel (poço às rodas).

Mais uma vez é possível verificar que o biodiesel ao longo do seu ciclo de vida apresenta menores emissões globais de metano. Este gás embora não sendo tóxico tem uma importante contribuição para o efeito de estufa. As emissões deste gás têm como principal fonte a utilização de gás natural durante as etapas de produção de ambos os combustíveis. A diferença registada entre as emissões deve-se sobretudo às quantidades de gás natural que são empregues, no caso da produção de biodiesel como é consumido menos gás natural também é libertado menos metano para a atmosfera.



Os resultados para as emissões de óxido nitroso (N_2O) podem ser observados na próxima figura.

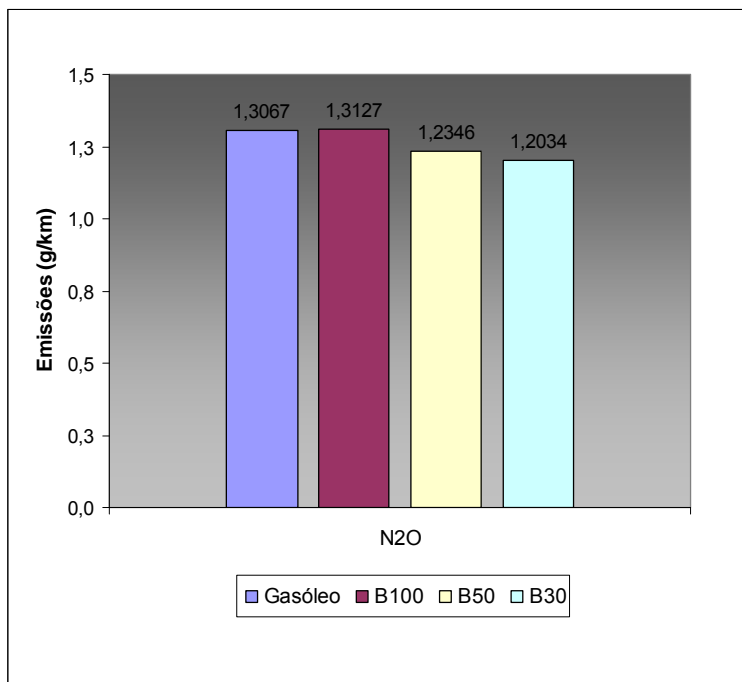


Figura 62. Gráfico comparativo das emissões de N_2O totais no ciclo de vida do gasóleo e do biodiesel (poço às rodas).

As emissões de N_2O no ciclo de vida do biodiesel são mais elevadas que no caso do gasóleo. Este gás tem uma grande contribuição para o efeito de estufa e as suas têm como origem para além das actividades humanas relacionadas com a queima de combustíveis fósseis, origem natural. Grande parte das emissões globais de N_2O têm como origem a actividade microbiana nos solos e oceanos. Outra importante fonte destas emissões reside na produção e utilização de fertilizantes agrícolas à bases de azoto. Esta última é a principal causa da diferença observada entre as emissões de N_2O nas produções de biodiesel e gasóleo.



Relativamente às emissões de dióxido de carbono (CO_2) os resultados são apresentados na figura seguinte.

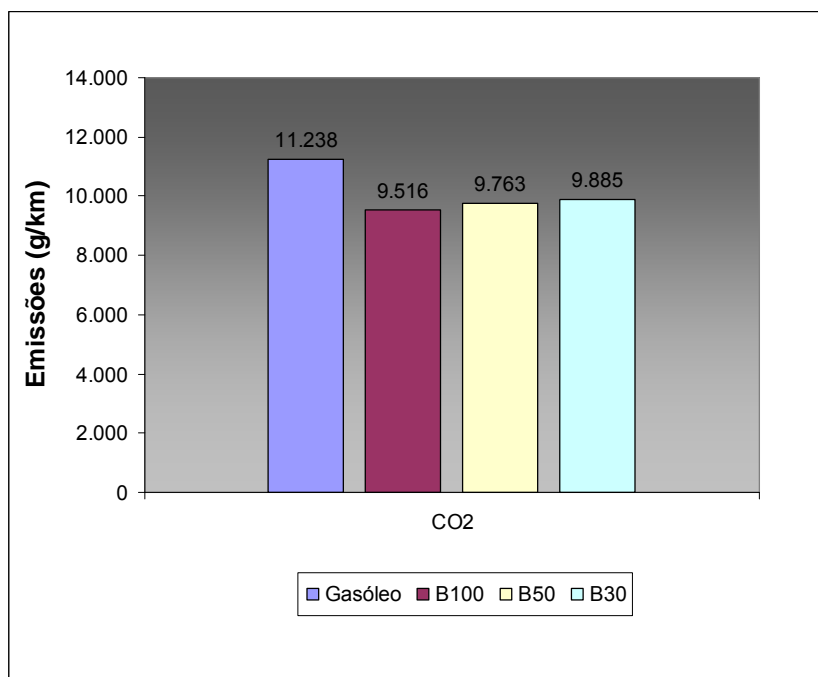


Figura 63. Gráfico comparativo das emissões de CO_2 totais no ciclo de vida do gasóleo e do biodiesel (poço às rodas).

Como pode ser observado na Figura 63, as emissões globais de CO_2 no ciclo de vida do biodiesel são significativamente menores que no caso do gasóleo. Embora na fase de combustão nos veículos a diferença de níveis de emissões seja residual (ver Tabela 66), a diferença verificada na análise do “poço à bomba” (ver Figura 55) tem um grande peso na contabilização global de emissões. No caso do biodiesel deve ainda ser tido em conta o facto de o CO_2 libertado na sua combustão ser compensado pela fixação deste gás durante a fotossíntese realizada pelas plantas de colza.

Para além dos valores totais das emissões de cada gás associadas ao ciclo de vida dos combustíveis é importante conhecer os impactos ambientais que cada combustível acarreta. Neste sentido serão considerados os impactos no efeito de estufa, acidificação da atmosfera e impactos na saúde humana.



Impactos sobre o efeito de estufa

O efeito de estufa é um fenómeno natural de absorção de radiação solar reflectida pela superfície terrestre. Esta absorção é realizada por determinados gases presentes na atmosfera e quanto maior for a sua concentração, maior é a absorção de radiação. Os gases responsáveis pelo efeito estufa são o dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) e o metano (CH_4).

Os gases mencionados não possuem todos o mesmo potencial de efeito estufa, os seus potenciais podem ser observados na Tabela 14. Seguidamente é apresentado um gráfico onde podem ser observados os impactos directos do biodiesel e do gasóleo no efeito estufa.

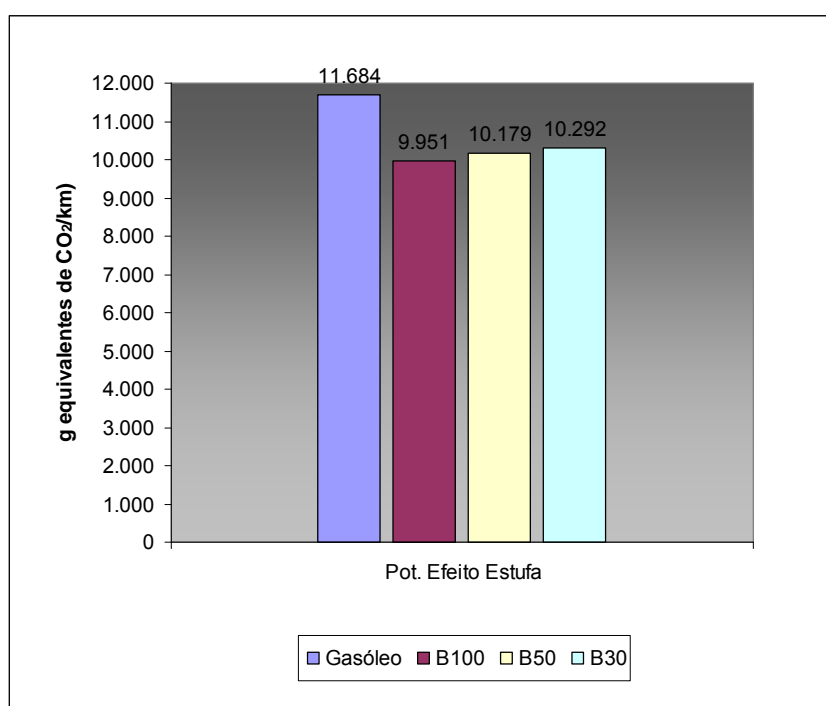


Figura 64. Gráfico comparativo dos impactos directos no efeito estufa do ciclo de vida do gasóleo e do biodiesel (poço às rodas).

Na Figura 64 é possível observar que o biodiesel apresenta benefícios em relação à emissão de gases de efeito estufa. Globalmente, considerando os factores da Tabela 14 e as emissões de N_2O , CO_2 e CH_4 , verifica-se que o potencial de efeito de estufa do biodiesel é de $9951\text{g}_{\text{equivalentes de CO}_2}$ enquanto que no caso do gasóleo este valor sobe para 11684g . Estes valores significam um decréscimo de cerca de 15% de potencial de efeito de estufa na substituição de gasóleo por biodiesel puro.

Embora as emissões de N_2O no caso do biodiesel sejam superiores (Figura 62) são largamente compensadas pelas menores emissões registadas para o CH_4 e CO_2 (Figura 61 e Figura 63).



Impactos sobre a acidificação da atmosfera

A acidificação da atmosfera é causada pelo aumento da concentração de substâncias ácidas ricas em enxofre e azoto na atmosfera. Neste problema assumem particular importância os óxidos de azoto (NOx) e de enxofre (SOx). A principal consequência da acidificação da atmosfera é a ocorrência de chuvas ácidas.

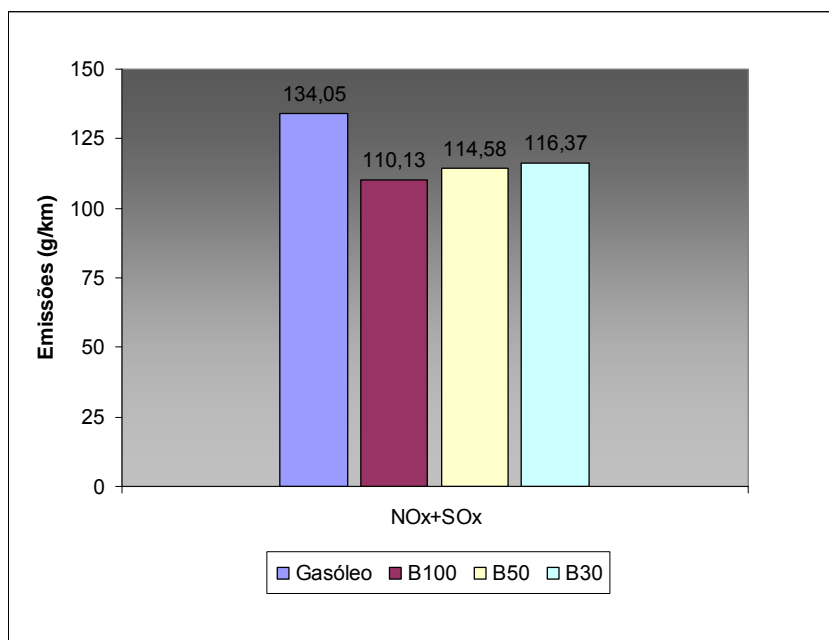


Figura 65. Gráfico comparativo das emissões responsáveis pela acidificação da atmosfera do ciclo de vida do gasóleo e do biodiesel (poço às rodas).

Atendendo à Figura 65 é possível verificar que no decorrer do seu ciclo de vida o biodiesel apresenta. Globalmente em todo o seu ciclo de vida, o biodiesel apresenta uma redução de 18% de emissões conjuntas de NOx e SOx em relação ao gasóleo. Esta redução de emissões de NOx e SOx leva a impactos mais reduzidos na acidificação da atmosfera e suas consequências nomeadamente chuvas ácidas.



Impactos sobre a saúde humana

Os impactos sobre a saúde humana que o gasóleo e o biodiesel apresentam ao longo do seu ciclo de vida são causados principalmente pelas emissões resultantes da sua combustão. As emissões com maior impacto directo sobre a saúde humana são principalmente as de VOC, CO, NOx, partículas e SOx (mais precisamente SO₂). Estes gases têm como principais consequências problemas a respiratórios e de aparecimento de células cancerosas.

Os efeitos na saúde humana dos gases mencionados acima são os seguintes:

- VOC – certos compostos orgânicos são cancerígenos.
- CO – afecta a respiração bloqueando as trocas de oxigénio na hemoglobina do sangue. Provoca problemas a nível cerebral e sensorial em caso de exposições prolongadas. Devido ao facto de ser incolor e inodoro em situações de exposição em recintos confinados pode levar à morte.
- NOx – provoca problemas respiratórios a nível dos pulmões, principalmente bronquites crónicas.
- SOx – provoca problemas respiratórios a nível dos pulmões e vias respiratórias.

Uma vez que durante o ciclo de vida do biodiesel as emissões dos gases mencionados são menores, também os seus impactos na saúde humana são menores. Desta forma, para os gases e impactos considerados acima, o biodiesel acarreta menores malefícios para a saúde humana.



Capítulo 7. Conclusões

O principal objectivo deste trabalho de dissertação consistiu na elaboração de uma ferramenta numérica de análise de ciclo de vida baseada no modelo GREET mas aplicada à realidade nacional.

Para o efeito foi realizada uma pesquisa bibliográfica no sentido de recolher informação relativa a técnicas de análise de ciclo de vida e ao biodiesel, desde as suas propriedades, matérias primas e processos de produção.

O principal passo para a elaboração de uma base de dados suficientemente adaptada à realidade portuguesa ou europeia, consistiu no levantamento de informação das diversas fases do ciclo de vida do biodiesel. Em casos onde a recolha de dados credíveis não foi possível foram tomados como válidos os fornecidos pela base de dados do GREET. Estes casos ocorreram principalmente nas fases associadas à extracção de matérias primas como crude, carvão e de combustíveis derivados de petróleo. No entanto, estes pressupostos não estarão muito desfasadas da realidade europeia, uma vez que os dados adoptados reportam a processos implementados à escala mundial e que pouco mudarão de país para país.

Os campos onde as realidades portuguesa e americana mais se distanciam são os da produção eléctrica, produção de biodiesel e nos veículos em circulação. Nestes campos foram adoptados dados referentes à realidade nacional, ou, em último caso, a casos de aplicação a nível europeu.

Relativamente à produção eléctrica foram adoptados dados fornecidos pela EDP e pela Agência Internacional de Energia. Os dados recolhidos permitiram observar a grande dependência de Portugal em combustíveis fósseis e a tecnologias que implicam a sua combustão em centrais térmicas.

No caso da produção de biodiesel, os dados mais relevantes foram obtidos de estudos realizados em países como a França (Staat F., Vermeersch G., 1997), Holanda (Gaya J., 2003) e Bélgica (Halleux H. et al, 2008). Os consumos e emissões associados à produção de biodiesel são em grande medida afectados pela mecanização das explorações agrícolas, pela distância a percorrer pelas matérias primas pela produção e utilização de químicos agrícolas e pelos processos de extracção de óleo vegetal. Em todos estes processos são consumidos combustíveis fósseis quer de forma directa quer de forma indirecta através do consumo de energia eléctrica quer através do transporte de matérias.

Ao nível dos veículos, foi efectuado o levantamento de expressões matemáticas apresentadas no *Emission Inventory Guidebook* elaborado pela Agência Europeia do Ambiente (Emission Inventory Guidebook, 2007). Estas foram aplicadas na base de dados do MACVC e permitem, para cada tipo de veículo, determinar o consumo de combustível e as emissões gasosas mediante uma determinada velocidade média de percurso. Para as emissões



decorrentes da utilização de biodiesel em veículos de motor diesel foram considerados factores de correcção fornecidos pela *National Biodiesel Board* (<http://www.Biodiesel.org>).

No final foram consideradas as contribuições de todas as fases intervenientes no ciclo de vida dos combustíveis desde a extracção de petróleo até à utilização nos veículos para realizar a análise de ciclo de vida dos combustíveis. Esta análise é efectuada de duas formas: uma considerando apenas as fases de produção e transporte dos combustíveis denominada “poço à bomba” e outra onde é incluída a contribuição dos veículos “poço às rodas”.

Após a elaboração do modelo de cálculo foi apresentado um caso de aplicação prática a dois percursos dos TUB, onde foram comparados valores obtidos com o MACVC e valores previamente calculados através do Copert e GREET.

As conclusões que se podem retirar do estudo realizado são as seguintes:

- Os resultados obtidos com o MACVC relativos a consumos de combustível para os veículos considerados no caso de estudo aproximam-se bastante dos valores fornecidos pelos TUB para a linha 24 (Tabela 40). No caso da linha 34 (Tabela 45) os resultados apresentam-se bastante distantes não apresentando aproximações suficientes para se aplicarem à linha em causa. A diferença entre as linhas verifica-se sobretudo no tipo e topologia dos percursos em causa. Uma vez que os melhores resultados foram obtidos na linha 24, composta por um percurso exclusivamente urbano e plano. Pode-se afirmar que o modelo se encontra mais adequado à aplicação em percursos urbanos sem grandes alterações topográficas.
- Independentemente do tipo de percurso, o consumo de combustível e as emissões gasosas são nitidamente afectadas pelas normas Europeias que legislam os veículos (Tabela 40, Tabela 41 e Tabela 42). Veículos mais recentes, são mais eficientes e estão sujeitos a regulamentações mais exigentes, logo implicam menores consumos e emissões gasosas.
- As taxas de ocupação/carga dos veículos afectam igualmente o desempenho dos veículos, maiores taxas de ocupação implicam maiores consumos e emissões (Tabela 40, Tabela 41 e Tabela 43).
- A utilização de biodiesel e suas misturas em veículos de motor diesel leva a reduções de emissões de gases poluentes e de efeito estufa à saída do escape (Figura 38 a Figura 45), sendo a excepção verificada nas emissões de NOx (Figura 40 e Figura 41).



- Comparando os ciclos de vida do gasóleo e do biodiesel conclui-se que na análise “poço à bomba” o consumo de energia total associado ao biodiesel é cerca de 6% superior que no caso do gasóleo (219,8kJ/kWh no caso do gasóleo e 233,1kJ/kWh no caso do biodiesel). Já no caso das emissões gasosas conclui-se que estas são geralmente inferiores para o biodiesel (Figura 48 aFigura 55). A única exceção é verificada nas emissões de N₂O (Figura 54) que são maiores em grande parte devido à utilização de químicos agrícolas à base de azoto. Em termos numéricos, as variações entre as emissões globais do “poço à bomba” do biodiesel em relação ao gasóleo podem ser observadas na próxima tabela.

	Variação em rel. ao gasóleo
VOC	-6%
CO	-7%
NO _x	-9%
PM10	-8%
PM2,5	-8%
SO _x	-46%
CH ₄	-12%
N ₂ O	14%
CO ₂	-6%

Tabela 79. Variações das emissões do “poço à bomba” do biodiesel em relação ao gasóleo.

- Considerando a análise “poço às rodas” (Tabela 71 aTabela 78) em termos de consumo energético por quilómetro, conclui-se que o consumo total de energia associado ao ciclo de vida do biodiesel (17.820kJ/km) é maior que o associado ao gasóleo (16.292kJ/km). Comparando os consumos energéticos do “poço à bomba” e do “poço às rodas” verifica-se a mesma tendência sendo agora a diferença de cerca de 9,5%. Relativamente às misturas de biodiesel e gasóleo, verifica-se que à medida que os teores em gasóleo são maiores, maior é a proximidade dos valores em relação ao gasóleo. No caso das misturas B50 e B30 as diferenças em relação ao gasóleo são de 3% e 4,5% respectivamente.



- Relativamente às emissões gasosas do “poço às rodas” (Figura 57 aFigura 63) conclui-se que o biodiesel envolve níveis de emissão inferiores ao gasóleo, sendo que as diferenças são mais significativas no caso das emissões de SO_x (Figura 60). A excepção à tendência verificada continua a residir nas emissões de N₂O (Figura 62) onde o biodiesel apresenta valores de emissões totais mais elevados. Na próxima tabela podem ser observadas as variações dos valores totais de emissões gasosas do ciclo de vida do biodiesel em relação ao gasóleo.

	Varição em rel. ao gasóleo
VOC	-16%
CO	-17%
NO _x	-17%
PM ₁₀	-22%
PM _{2,5}	-23%
SO _x	-52%
CH ₄	-22%
N ₂ O	0,5%
CO ₂	-15%

Tabela 80. Variações das emissões totais do “poço às rodas” do biodiesel em relação ao gasóleo.

- Em relação aos impactos sobre o efeito de estufa, as menores emissões de CO₂, CH₄ no ciclo de vida do biodiesel compensam as emissões de N₂O. Desta forma os impactos referentes ao efeito de estufa associados ao ciclo de vida do biodiesel são menores que os associados ao gasóleo (Figura 64).
- No caso dos impactos relativos à acidificação da atmosfera pode-se concluir que o biodiesel acarreta menores impactos (Figura 65). As emissões de NO_x e de SO_x são as principais responsáveis por este fenómeno e em ambas o biodiesel apresenta valores totais mais baixos que o gasóleo.
- No plano dos impactos sobre a saúde humana, uma vez que a quantidade de gases nocivos emitida ao longo do ciclo de vida do biodiesel é menor, pode-se concluir que este apresenta impactos menos nocivos. No entanto, a análise efectuada é bastante superficial sendo necessários estudos mais aprofundados para tirar conclusões mais precisas em relação a este tema.



Com a realização deste trabalho foi possível a elaboração de uma ferramenta capaz de fornecer resultados interessantes e que devem ser tidos em consideração. Esta ferramenta permite efectuar de uma forma simples e rápida análises de ciclo de vida para os combustíveis mais comuns em Portugal e não apenas para o biodiesel. Embora os valores obtidos sejam fruto de aproximações e, em alguns casos obtidos através de bases de dados que não são relacionadas com a realidade portuguesa e relativos a diferentes anos, estes ainda assim podem ser considerados aplicáveis a Portugal. Comparações dos resultados obtidos neste trabalho com o relatório da Agência Internacional de Energia (AIE) de 1999 relativo a consumos e emissões associados ao ciclo de vida de combustíveis permitem verificar que existe convergência dos valores. No caso do consumo energético total do biodiesel no relatório da AIE é considerado um aumento em relação ao gasóleo compreendido entre 10% e 40%, o aumento calculado é de 9,5%. Tendo em conta que o relatório em causa reporta a 1999 e os avanços tecnológicos dos últimos anos verificados na produção de biodiesel é possível considerar que a diferença de consumo energético total será actualmente mais baixa que a verificada em 1999. Estas considerações podem ajudar a explicar que o resultado obtido esteja situado no nível inferior do intervalo de resultados do relatório da AIE.

O desenvolvimento do modelo é um processo ainda em evolução, uma vez que ainda existem lacunas a preencher tanto a nível da base de dados como a nível de interface entre modelo e utilizador. A nível da base de dados há ainda muitos dados que são baseados no GREET e em dados fornecidos por estudos aplicados a países que não Portugal. Os dados relativos às tecnologias de combustão dos diversos processos produtivos podem ser melhorados de forma a espelharem com mais precisão os processos aplicados em Portugal. Os coeficientes de consumo e emissões associados a navios de transporte devem ser ainda alvos de melhoramento. Estes são obtidos por intermédio de equações muito gerais não havendo distinção entre diferentes tipos e tamanhos de navios. A base de dados relativa à produção de químicos agrícolas também deverá ser alvo de melhorias, uma vez que foram encontradas muitas dificuldades na obtenção de dados credíveis sobre a sua produção. A melhoria da base de dados do modelo desenvolvido poderá ser realizada através da elaboração de inquéritos a empresas associadas aos processos em causa, principalmente empresas de produção de biodiesel, químicos e produtores agrícolas.



Capítulo 8. Bibliografia

- *2006 Standard Review of Portugal*, IEA, 2006
- *A colza: Manual de cultura*, TAGOL, 2006.
- Agência Europeia do Ambiente, <http://www.eea.europa.eu/>, acedido em Junho de 2008.
- Agência Internacional de Energia, <http://www.iea.org>, acedido em Julho de 2008.
- *Ambiente, Energia e Transportes*, PORTAL, 2003.
- *Application of biologically derived products as fuels or additives in combustion engines*, Directorate – General XII, 1994
- *Automotive fuels for the future, The search for alternatives*, IEA, 1999
- Bernesson S., *Farm-scale Production of RME and Ethanol for Heavy Diesel Engines*, Uppsala, 2004.
- Biobieselbr, <http://biodieselbr.com>, acedido em Junho de 2008
- Camús J., Laborda L., *Biocarburantes Líquidos: Biodiesel y Bioetanol*, Madrid, 2006.
- Direcção Geral de Geologia e Energia, <http://www.dgge.pt>, acedido em Junho de 2008.
- EDP, <http://www.edp.pt>, acedido em Julho de 2008.
- *Emission Inventory Guidebook*, EEA, 2007.
- *Energias Renováveis em Portugal*, Ministério da Economia e da Inovação, 2007.
- Environmental Protection Agency, <http://www.epa.gov>, acedido em Julho de 2008.
- *Estratégia da EU para Biocombustíveis*, Comissão Europeia, 2006.
- *Estratégia Nacional para a Energia*, DGGE, 2006.
- Ferreira J., *Análise do ciclo de vida dos produtos*, Instituto Politécnico de Viseu, 2004.



- Ferrari R., et al., *Biodiesel de soja: Taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físico-química e consumo gerador de energia*, Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2005.
- Gartner S., et al., *Life Cycle Assessment of Biodiesel: Update and new aspects*, Heidelberg, 2003.
- Gaya J., *Biodiesel from Rapessed oil and used frying oil in European Union*, Utrecht, 2003.
- *Guia técnico do sector da Produção, Transporte e Distribuição de Energia*, INETI, 2003.
- Halleux H., Lassaux S., Renzoni R., Germain A., *Comparative Life Cycle Assessment of Two Biofuels: Ethanol from Sugar Beet and Rapeseed Methyl Ester*, University of Liège 2008
- Kucek K., *Otimização da transesterificação etílica de óleo de Soja em meio alcalino*, Curitiba, 2004.
- *Life Cycle Assessment: Principles and Practice*, USEPA, 2006.
- Macias J., et al., *Desarollo agroindustrial de biocombustibles en Castilla y León*, Salamanca, 2006.
- Marzullo R., *Análise da ecoeficiência dos óleos vegetais oriundos da Soja e Palma visando a produção de Biodiesel*, São Paulo, 2007.
- Mota P., *Energia e competitividade económica: o factor fiscalidade*, Ministério das Finanças e da Administração Pública, 2007.
- *Petróleo, Gás Natural e Carvão*, DGGE, 2005.
- *Plano Estratégico Nacional: Desenvolvimento rural*, 2007.
- Portal ambiente online, <http://ambienteonline.pt>, acedido em Maio de 2008.
- Portal das Energias Renováveis, <http://energiasrenovaveis.com>, acedido em Maio de 2008.
- Quinta Nova A., Sampaio L., *Implementação Tecnológica de Biodiesel numa Frota de Autocarros*, Universidade de Aveiro, 2007.
- *Relatório do Estado do Ambiente em Portugal*, REA, Ministério do Ambiente do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento, 2004



- *Road Transport: Passenger cars, Light Duty Vehicles, Heavy Duty Vehicles*, EGTEI, 2005.
- Santos D. C., Peixoto L. B., Torres E. A., *Análise de Emissões e de Consumo Específico de um Motor Diesel Operando com Biodiesel de Soja e de Óleos e Gorduras Residuais*, Universidade Federal da Bahia.
- Sheehan J., et al., *A Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program – Biodiesel from Algae*, NREL, 1998.
- Silva M., Fernandes A., *Relatório sobre Biodiesel*, 2006.
- Teixeira R., *Análise de viabilidade da produção de biocombustíveis para o sector dos transportes, com recursos a matéria-prima endógena*, Universidade de Aveiro, 2007
- *Una Estrategia de Biocarburantes para España*, APPA, 2005.



Capítulo 9. Anexos

Vehicle Class	Engine Capacity	Speed Range (km/h)	CO Emission Factor (g/km)	R ²
PRE ECE	All capacities	10-100	$281V^{-0.650}$	0.924
	All capacities	100-130	$0.112V + 4.32$	-
ECE 15-00/01	All capacities	10-50	$313V^{-0.760}$	0.898
	All capacities	50-130	$27.22 - 0.406V + 0.0032V^2$	0.158
ECE 15-02	All capacities	10-60	$300V^{-0.797}$	0.747
	All capacities	60-130	$26.260 - 0.440V + 0.0026V^2$	0.102
ECE 15-03	All capacities	10-20	$161.36 - 45.62\ln(V)$	0.790
	All capacities	20-130	$37.92 - 0.680V + 0.00377V^2$	0.247
ECE 15-04	All capacities	10-60	$260.788 \cdot V^{-0.910}$	0.825
	All capacities	60-130	$14.653 - 0.220V + 0.001163V^2$	0.613
Improved Conventional	CC < 1.4 l	10-130	$14.577 - 0.294V + 0.002478V^2$	0.781
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$8.273 - 0.151V + 0.000957V^2$	0.767
Open Loop	CC < 1.4 l	10-130	$17.882 - 0.377V + 0.002825V^2$	0.656
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$9.446 - 0.230V + 0.002029V^2$	0.719

Anexo 1. Factores de emissão de CO para veículos ligeiros de passageiros pré Euro.

Fonte: *Emission Inventory Guidebook, 2007*

Vehicle Class	Engine Capacity	Speed Range (km/h)	VOC Emission Factor (g/km)	R ²
PRE ECE	All capacities	10-100	$30.34V^{-0.693}$	0.980
	All capacities	100-130	1.247	-
ECE 15-00/01	All capacities	10-50	$24.99V^{-0.704}$	0.901
	All capacities	50-130	$4.85V^{-0.318}$	0.095
ECE 15-02/03	All capacities	10-60	$25.75V^{-0.714}$	0.895
	All capacities	60-130	$1.95 - 0.019V + 0.00009V^2$	0.198
ECE 15-04	All capacities	10-60	$19.079V^{-0.693}$	0.838
	All capacities	60-130	$2.608 - 0.037V + 0.000179V^2$	0.341
Improved Conventional	CC < 1.4 l	10-130	$2.189 - 0.034V + 0.000201V^2$	0.766
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$1.999 - 0.034V + 0.000214V^2$	0.447
Open Loop	CC < 1.4 l	10-130	$2.185 - 0.0423V + 0.000256V^2$	0.636
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$0.808 - 0.016V + 0.000099V^2$	0.49

Anexo 2. Factores de emissão de VOC para veículos ligeiros de passageiros a gasolina pré Euro.

Fonte: *Emission Inventory Guidebook, 2007*



Vehicle Class	Engine Capacity	Speed Range (km/h)	NO _x Emission Factor (g/km)	R ²
PRE ECE ECE 15-00/01	CC < 1.4 l	10-130	$1.173 + 0.0225V - 0.00014V^2$	0.916
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$1.360 + 0.0217V - 0.00004V^2$	0.960
	CC > 2.0 l	10-130	$1.5 + 0.03V + 0.0001V^2$	0.972
ECE 15-02	CC < 1.4 l	10-130	$1.479 - 0.0037V + 0.00018V^2$	0.711
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$1.663 - 0.0038V + 0.00020V^2$	0.839
	CC > 2.0 l	10-130	$1.87 - 0.0039V + 0.00022V^2$	-
ECE 15-03	CC < 1.4 l	10-130	$1.616 - 0.0084V + 0.00025V^2$	0.844
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$1.29e^{0.0099V}$	0.798
	CC > 2.0 l	10-130	$2.784 - 0.0112V + 0.000294V^2$	0.577
ECE 15-04	CC < 1.4 l	10-130	$1.432 + 0.003V + 0.000097V^2$	0.669
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$1.484 + 0.013 \cdot V + 0.000074V^2$	0.722
	CC > 2.0 l	10-130	$2.427 - 0.014V + 0.000266V^2$	0.803
Improved Conventional	CC < 1.4 l	10-130	$-0.926 + 0.719\ln(V)$	0.883
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$1.387 + 0.0014V + 0.000247V^2$	0.876
Open Loop	CC < 1.4 l	10-130	$-0.921 + 0.616\ln(V)$	0.791
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$-0.761 + 0.515\ln(V)$	0.495

Anexo 3. Factores de emissão de NO_x para veículos ligeiros de passageiros a gasolina pré Euro.

Fonte: *Emission Inventory Guidebook*, 2007

Vehicle Class	Cylinder Capacity	Speed Range (km/h)	Fuel Consumption Factor (g/km)	R ²
PRE ECE	CC < 1.4 l	10-60	$521V^{-0.554}$	0.941
		60-80	55	-
		80-130	$0.386V + 24.143$	-
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-60	$681V^{-0.583}$	0.936
		60-80	67	-
		80-130	$0.471V + 29.286$	-
	CC > 2.0 l	10-60	$979V^{-0.628}$	0.918
		60-80	80	-
		80-130	$0.414V + 46.867$	-
ECE 15-00/01	CC < 1.4 l	10-60	$595V^{-0.63}$	0.951
		60-130	$95 - 1.324V + 0.0086V^2$	0.289
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-60	$864V^{-0.69}$	0.974
		60-130	$59 - 0.407V + 0.0042V^2$	0.647
	CC > 2.0 l	10-60	$1236V^{-0.764}$	0.976
		60-130	$65 - 0.407V + 0.0042V^2$	-
ECE 15-02/03	CC < 1.4 l	10-50	$544V^{-0.63}$	0.929
		50-130	$85 - 1.108V + 0.0077V^2$	0.641
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-50	$879V^{-0.72}$	0.950
		50-130	$71 - 0.7032V + 0.0059V^2$	0.830
	CC > 2.0 l	10-50	$1224V^{-0.756}$	0.961
		50-130	$111 - 1.333V + 0.0093V^2$	0.847

Anexo 4. Factores de consumo de combustível para veículos ligeiros de passageiros pré Euro.

Fonte: *Emission Inventory Guidebook*, 2007



Pollutant	Emission Standard	Engine capacity	Speed Range (km/h)	R ²	a	b	c	d	e
CO	Euro 1	All capacities	10-130	0.87	1.12E+01	1.29E-01	-1.02E-01	-9.47E-04	6.77E-04
	Euro 2	All capacities	10-130	0.97	6.05E+01	3.50E+00	1.52E-01	-2.52E-02	-1.68E-04
	Euro 3	All capacities	10-130	0.97	7.17E+01	3.54E+01	1.14E+01	-2.48E-01	
	Euro 4	All capacities	10-130	0.93	1.36E-01	-1.41E-02	-8.91E-04	4.99E-05	
HC	Euro 1	All capacities	10-130	0.82	1.35E+00	1.78E-01	-6.77E-03	-1.27E-03	
	Euro 2	All capacities	10-130	0.95	4.11E+06	1.66E+06	-1.45E+04	-1.03E+04	
	Euro 3	All capacities	10-130	0.88	5.57E-02	3.65E-02	-1.10E-03	-1.88E-04	1.25E-05
	Euro 4	All capacities	10-130	0.10	1.18E-02		-3.47E-05		8.84E-07
NO _x	Euro 1	All capacities	10-130	0.86	5.25E-01		-1.00E-02		9.36E-05
	Euro 2	All capacities	10-130	0.52	2.84E-01	-2.34E-02	-8.69E-03	4.43E-04	1.14E-04
	Euro 3	All capacities	10-130	0.80	9.29E-02	-1.22E-02	-1.49E-03	3.97E-05	6.53E-06
	Euro 4	All capacities	10-130	0.71	1.06E-01		-1.58E-03		7.10E-06
FC	Euro 1	<1.4	10-130	0.99	1.91E+02	1.29E-01	1.17E+00	-7.23E-04	
		1.4-2.0	10-130	0.98	1.99E+02	8.92E-02	3.46E-01	-5.38E-04	
		>2.0	10-130	0.93	2.30E+02	6.94E-02	-4.26E-02	-4.46E-04	
	Euro 2	<1.4	10-130	0.99	2.08E+02	1.07E-01	-5.65E-01	-5.00E-04	1.43E-02
		1.4-2.0	10-130	0.98	3.47E+02	2.17E-01	2.73E+00	-9.11E-04	4.28E-03
		>2.0	10-130	0.98	1.54E+03	8.69E-01	1.91E+01	-3.63E-03	
	Euro 3	<1.4	10-130	0.99	1.70E+02	9.28E-02	4.18E-01	-4.52E-04	4.99E-03
		1.4-2.0	10-130	0.99	2.17E+02	9.60E-02	2.53E-01	-4.21E-04	9.65E-03
		>2.0	10-130	0.99	2.53E+02	9.02E-02	5.02E-01	-4.69E-04	
	Euro 4	<1.4	10-130	0.95	1.36E+02	2.60E-02	-1.65E+00	2.28E-04	3.12E-02
		1.4-2.0	10-130	0.96	1.74E+02	6.85E-02	3.64E-01	-2.47E-04	8.74E-03
		>2.0	10-130	0.98	2.85E+02	7.28E-02	-1.37E-01	-4.16E-04	

Anexo 5. Valores dos factores da equação 1 para veículos ligeiros de passageiros a gasolina.

Fonte: *Emission Inventory Guidebook, 2007*

Pollutant	Engine Capacity	Speed Range [km/h]	Emission Factor [g/km]	R ²
CO	All capacities	10-130	$5.41301V^{-0.574}$	0.745
NO _x	CC < 2.0l	10-130	$0.918 - 0.014V + 0.000101V^2$	0.949
	CC > 2.0l	10-130	$1.331 - 0.018V + 0.000133V^2$	0.927
VOC	All capacities	10-130	$4.61 V^{-0.937}$	0.794
PM	All capacities	10-130	$0.45 - 0.0086V + 0.000058V^2$	0.439
Fuel Consumption	All capacities	10-130	$118.489 - 2.084V + 0.014V^2$	0.583

Anexo 6. Factores de emissão e consumo para veículos ligeiros de passageiros a gasóleo convencionais.

Fonte: *Emission Inventory Guidebook, 2007*



Pollutant	Emission Standard	Engine capacity	Speed Range (km/h)	R ²	a	b	c	d	e	f
CO	Euro 1	All capacities	10-130	0.94	9.96E-01		-1.88E-02		1.09E-04	
	Euro 2	All capacities	10-130	0.91	9.00E-01		-1.74E-02		8.77E-05	
	Euro 3	All capacities	10-130	0.95	1.69E-01		-2.92E-03		1.25E-05	1.10E+00
	Euro 4	All capacities	10-130	See table footnote						
HC	Euro 1	<2.0	10-130	0.93	1.42E-01	1.38E-02	-2.01E-03	-1.90E-05	1.15E-05	
		>2.0	10-130	0.98	1.59E-01		-2.46E-03		1.21E-05	
	Euro 2	<2.0	10-130	0.99	1.61E-01	7.46E-02	-1.21E-03	-3.35E-04	3.63E-06	
		>2.0	10-130	0.98	5.01E+04	3.80E+04	8.03E+03	1.15E+03	-2.66E+01	
	Euro 3	<2.0	10-130	0.99	9.65E-02	1.03E-01	-2.38E-04	-7.24E-05	1.93E-06	
		>2.0	10-130	0.54	9.12E-02		-1.68E-03		8.94E-06	
	Euro 4	All capacities	10-130		3.47E-02	2.69E-02	-6.41E-04	1.59E-03	1.12E-05	0
NO _x	Euro 1	All capacities	10-130	0.96	3.10E+00	1.41E-01	-6.18E-03	-5.03E-04	4.22E-04	
	Euro 2	All capacities	10-130	0.94	2.40E+00	7.67E-02	-1.16E-02	-5.00E-04	1.20E-04	
	Euro 3	All capacities	10-130	0.92	2.82E+00	1.98E-01	6.69E-02	-1.43E-03	-4.63E-04	
	Euro 4	All capacities	10-130		1.11E+00		-2.02E-02		1.48E-04	0
PM	Euro 1	All capacities	10-130	0.70	1.14E-01		-2.33E-03		2.26E-05	
	Euro 2	All capacities	10-130	0.71	8.66E-02		-1.42E-03		1.06E-05	
	Euro 3	All capacities	10-130	0.81	5.15E-02		-8.80E-04		8.12E-06	
	Euro 4	All capacities	10-130		4.50E-02		-5.39E-04		3.48E-06	
FC	Euro 1	<2.0	10-130	0.98	1.45E+02	6.73E-02	-1.88E-01	-3.17E-04	9.47E-03	
		>2.0	10-130	0.96	1.95E+02	7.19E-02	1.87E-01	-3.32E-04	9.99E-03	
	Euro 2	<2.0	10-130	0.97	1.42E+02	4.98E-02	-6.51E-01	-1.69E-04	1.32E-02	
		>2.0	10-130	0.96	1.95E+02	7.19E-02	1.87E-01	-3.32E-04	9.99E-03	
	Euro 3	<2.0	10-130	0.95	1.62E+02	1.23E-01	2.18E+00	-7.76E-04	-1.28E-02	
		>2.0	10-130	0.96	1.95E+02	7.19E-02	1.87E-01	-3.32E-04	9.99E-03	

Note: The Euro 4 CO emission factor is given by $CO = 17.5E-3 + 86.42 \left[1 + e^{\frac{V+117.67}{-21.99}} \right]^{-1}$

Anexo 7. Valores dos factores da equação 1 para veículos ligeiros de passageiros a gasóleo pós Euro.

Fonte: *Emission Inventory Guidebook, 2007*

Pollutant	Vehicle Class	Speed Range [km/h]	Emission Factor [g/km]	R ²
CO	Conventional	10-110	$20E-05V^2 - 0.0256V + 1.8281$	0.136
	Euro 1	10-110	$22.3E-05V^2 - 0.026V + 1.076$	0.301
NO _x	Conventional	10-110	$81.6E-05V^2 - 0.1189V + 5.1234$	0.402
	Euro 1	10-110	$24.1E-05V^2 - 0.03181V + 2.0247$	0.0723
VOC	Conventional	10-110	$1.75E-05V^2 - 0.00284V + 0.2162$	0.0373
	Euro 1	10-110	$1.75E-05V^2 - 0.00284V + 0.2162$	0.0373
PM	Conventional	10-110	$1.25E-05V^2 - 0.000577V + 0.288$	0.0230
	Euro 1	10-110	$4.5E-05V^2 - 0.004885V + 0.1932$	0.224
Fuel Consumption	Conventional	10-110	$0.02113V^2 - 2.65V + 148.91$	0.486
	Euro 1	10-110	$0.0198V^2 - 2.506V + 137.42$	0.422

Anexo 8. Equações para cálculo de factores de emissão e consumo para veículos ligeiros de mercadorias a gasóleo convencionais e Euro 1.

Fonte: *Emission Inventory Guidebook, 2007*



Emission Standard	CO [%]	NOx [%]	VOC [%]	PM [%]
Euro 2- 96/69/EC	0	0	0	0
Euro 3 - 98/69/EC Stage 2000	18	16	38	33
Euro 4 - 98/69/EC Stage 2005	35	32	77	65
Euro 5 - EC 715/2007	35	51	77	98.25
Euro 6 – EC715/2007	35	78	77	98.25

Anexo 9. Percentagens de redução de emissões para veículos ligeiros de mercadorias pós Euro 1.

Fonte: *Emission Inventory Guidebook, 2007*

Subsegment	Pollutant	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
Coach Std <=18t 80ties	CO	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	7,998942	0,045091	14,7117	0,194689	1,125625
Coach Std <=18t Euro-1	CO	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	5,830689	0,043086	11,02878	0,177595	0,945455
Coach Std <=18t Euro-2	CO	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	5,91752	0,054595	14,52722	0,234033	0,944255
Coach Std <=18t Euro-3	CO	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	6,370806	0,045891	14,3162	0,214688	1,042333
Coach Std <=18t Euro-4	CO	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0,555901	0,048799	1,349717	0,201486	0,083153
Coach Std <=18t Euro-5	CO	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0,569769	0,048426	1,393567	0,201103	0,084774
Ubus Std >15-18t 80ties	CO	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	12,96961	0,054086	28,56999	0,255026	1,937024
Ubus Std >15-18t Euro-1	CO	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	5,239619	0,049113	8,023129	0,200843	0,847954
Ubus Std >15-18t Euro-2	CO	$y=(a+(b/(1+\exp((((1)^c)+d*\ln(x))))+(e*x))))$	0,362028	9,652152	3,500249	1,600548	-0,0061
Ubus Std >15-18t Euro-3	CO	$y=\exp((a+(b/x))+(c*\ln(x)))$	4,237411	-3,21755	-1,00556		
Ubus Std >15-18t Euro-4	CO	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0,539359	0,0554	0,960815	0,271175	0,066487
Ubus Std >15-18t Euro-5	CO	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0,543737	0,055219	0,978611	0,271735	0,06718

Anexo 10. Factores de emissão do CO para veículos pesados de passageiros.

Fonte: *Emission Inventory Guidebook, 2007*



Subsegment	Pollutant	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	CO	$y=((e+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	5,078955	0,050501	5,90538	0,352845	1,226696
RT <=7.5t Euro-1	CO	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp(((-1)*d)*x)))/d)))$	2,639434	0,00191	-0,13372	0,057705	
RT <=7.5t Euro-2	CO	$y=(1/(((c*(x^2))+b*x))+a))$	0,282514	0,059624	-0,00042		
RT <=7.5t Euro-3	CO	$y=((e+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	1,753133	0,048798	1,40627	0,227052	0,345132
RT <=7.5t Euro-4	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,028623	0,528053	-0,01078	0,483477	0,036421
RT <=7.5t Euro-5	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,028342	0,534024	-0,00073	0,489967	0,035486
RT >7,5-12t 80ties	CO	$y=((e+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	6,886401	0,054216	9,128347	0,20833	1,312757
RT >7,5-12t Euro-1	CO	$y=((e+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	3,264622	0,054773	3,137597	0,227612	0,590834
RT >7,5-12t Euro-2	CO	$y=((e+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	2,472764	0,065895	2,769864	0,281186	0,588185
RT >7,5-12t Euro-3	CO	$y=((e+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	3,342207	0,054885	2,873526	0,191946	0,562725
RT >7,5-12t Euro-4	CO	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp(((-1)*d)*x)))/d)))$	0,455696	-0,00031	-0,0324	0,083583	
RT >7,5-12t Euro-5	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,040067	0,363384	3,846825	1,535368	0,011174
RT >12-14t 80ties	CO	$y=((e+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	7,170598	0,055199	10,426	0,199025	1,468737
RT >12-14t Euro-1	CO	$y=((e+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	3,542839	0,0558	3,961319	0,228859	0,671778
RT >12-14t Euro-2	CO	$y=(1/(((c*(x^2))+b*x))+a))$	0,121074	0,035312	-0,00023		
RT >12-14t Euro-3	CO	$y=((e+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	3,57796	0,057645	4,321144	0,194652	0,650832
RT >12-14t Euro-4	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,033323	0,382035	4,738282	1,988688	-0,01313
RT >12-14t Euro-5	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,033117	0,389881	4,743782	1,98872	-0,01315
RT >14-20t 80ties	CO	$y=((e+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	9,81719	0,053478	14,5535	0,179438	1,991286
RT >14-20t Euro-1	CO	$y=((e+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	4,730261	0,054427	5,079013	0,188914	0,908155
RT >14-20t Euro-2	CO	$y=((e+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	3,391244	0,060669	4,025893	0,220135	0,795983
RT >14-20t Euro-3	CO	$y=((e+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	4,568644	0,053731	6,3848	0,170659	0,843046
RT >14-20t Euro-4	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,02941	0,601892	4,384491	1,868717	-0,01431
RT >14-20t Euro-5	CO	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,029256	0,614548	4,372884	1,864961	-0,01428

Anexo 11. Factores de emissão de CO para veículos pesados de mercadorias.

Fonte: *Emission Inventory Guidebook, 2007*

Subsegment	Pollutant	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
Coach Std <=18t 80ties	THC	$y=(1/(((c*(x^2))+b*x))+a))$	0,109624	0,021575	6,43E-05		
Coach Std <=18t Euro-1	THC	$y=(1/((a+(b*x^c))))$	0,145457	0,021552	1,050819		
Coach Std <=18t Euro-2	THC	$y=(1/((a+(b*x))))$	0,173126	0,040274			
Coach Std <=18t Euro-3	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,223462	16,91797	-0,63309	0,641431	0,025933
Coach Std <=18t Euro-4	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,010703	1,110668	-0,69373	0,697027	0,02365
Coach Std <=18t Euro-5	THC	$y=(a+(b/(1+\exp(((-1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,011074	1,219397	-0,77258	0,690994	0,02369
Ubus Std >15-18t 80ties	THC	$y=((e+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	5,290214	0,051078	28,04192	0,358849	0,770046
Ubus Std >15-18t Euro-1	THC	$y=((e+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	1,959975	0,051304	12,7212	0,441529	0,346386
Ubus Std >15-18t Euro-2	THC	$y=((e+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	1,404232	0,056057	11,85919	0,518574	0,238593
Ubus Std >15-18t Euro-3	THC	$y=((e+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	1,191342	0,052822	11,37455	0,5371	0,206525
Ubus Std >15-18t Euro-4	THC	$y=((e+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	0,068282	0,05411	0,525318	0,49506	0,009976
Ubus Std >15-18t Euro-5	THC	$y=((e+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	0,069717	0,054166	0,542544	0,498222	0,010206
Ubus Artic >18t 80ties	THC	$y=((e+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	5,776272	0,051785	30,91348	0,357332	0,794793
Ubus Artic >18t Euro-1	THC	$y=((e+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	2,151062	0,051964	13,5856	0,439689	0,375653
Ubus Artic >18t Euro-2	THC	$y=((e+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	1,519569	0,056107	12,19546	0,508149	0,25673
Ubus Artic >18t Euro-3	THC	$y=((e+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	1,290634	0,053354	11,58292	0,524577	0,221684
Ubus Artic >18t Euro-4	THC	$y=((e+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	0,073933	0,054575	0,539131	0,48027	0,01058
Ubus Artic >18t Euro-5	THC	$y=((e+(a*\exp(((-1)*b)*x)))+(c*\exp(((-1)*d)*x)))$	0,075267	0,054548	0,55435	0,482138	0,01079

Anexo 12. Factores de emissão de VOC para veículos pesados de passageiros.

Fonte: *Emission Inventory Guidebook, 2007*



Subsegment	Pollutant	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	THC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	3,035685	0,028491	4,554043	0,147232	0,344084
RT <=7.5t Euro-1	THC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0,649717	0,03936	0,610988	0,187736	0,125436
RT <=7.5t Euro-2	THC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0,414155	0,038038	0,440149	0,185537	0,076514
RT <=7.5t Euro-3	THC	$y=(1/(a+(b*(x^2))))$	1,248304	0,114645	1,038828		
RT <=7.5t Euro-4	THC	$y=(1/((c*(x^2))+(b*x))+a))$	21,07625	2,301977	0,008867		
RT <=7.5t Euro-5	THC	$y=(1/((c*(x^2))+(b*x))+a))$	20,89287	2,266481	0,008821		
RT >7.5-12t 80ties	THC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	1,9638	0,027553	5,271166	0,127206	0,297533
RT >7.5-12t Euro-1	THC	$y=(a+(b/(1+\exp((((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,126735	1,992803	3,699606	1,523679	-0,00198
RT >7.5-12t Euro-2	THC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0,585419	0,038256	0,930444	0,124804	0,124913
RT >7.5-12t Euro-3	THC	$y=(a+(b/(1+\exp((((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,051233	1,208984	4,065013	1,637483	-0,00651
RT >7.5-12t Euro-4	THC	$y=(a+(b/(1+\exp((((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,002935	0,072138	3,763967	1,55254	-0,00088
RT >7.5-12t Euro-5	THC	$y=(a+(b/(1+\exp((((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,003537	0,074047	3,646356	1,505719	0,002249
RT >12-14t 80ties	THC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	1,991832	0,030775	6,325612	0,130238	0,42458
RT >12-14t Euro-1	THC	$y=(a+(b/(1+\exp((((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,121221	2,308209	3,888875	1,659519	-0,0089
RT >12-14t Euro-2	THC	$y=(a+(b/(1+\exp((((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,052072	1,594648	3,635767	1,591147	-0,01019
RT >12-14t Euro-3	THC	$y=(a+(b/(1+\exp((((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,079249	1,353401	4,480717	1,869661	-0,01069
RT >12-14t Euro-4	THC	$y=(a+(b/(1+\exp((((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,002975	0,078753	4,314212	1,836361	-0,01135
RT >12-14t Euro-5	THC	$y=(a+(b/(1+\exp((((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,002938	0,080347	4,327611	1,842087	-0,01185
RT >14-20t 80ties	THC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	3,225084	0,036497	9,024343	0,138566	0,753569
RT >14-20t Euro-1	THC	$y=(a+(b/(1+\exp((((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,202277	3,412993	3,718801	1,612024	-0,00599
RT >14-20t Euro-2	THC	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	1,011469	0,043509	1,779433	0,153139	0,213952
RT >14-20t Euro-3	THC	$y=(a+(b/(1+\exp((((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,100137	2,145412	3,998947	1,722538	-0,00883
RT >14-20t Euro-4	THC	$y=(a+(b/(1+\exp((((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,003233	0,125853	3,898549	1,717687	-0,01112
RT >14-20t Euro-5	THC	$y=(a+(b/(1+\exp((((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,003229	0,12853	3,88482	1,713688	-0,01116

Anexo 13. Factores de emissão de VOC para veículos pesados de mercadorias.

Fonte: Emission Inventory Guidebook, 2007

Subsegment	Pollutant	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
Coach Std <=18t 80ties	NOx	$y=(1/((c*(x^2))+(b*x))+a))$	0,012603	0,003002	-2E-05		
Coach Std <=18t Euro-1	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	22,1067	0,062876	76,60349	0,362558	5,957076
Coach Std <=18t Euro-2	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	24,30588	0,059394	73,00523	0,336642	6,581691
Coach Std <=18t Euro-3	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	21,78823	0,054342	89,04304	0,24515	5,149501
Coach Std <=18t Euro-4	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	12,34057	0,055078	45,89428	0,271774	3,174945
Coach Std <=18t Euro-5	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	7,888633	0,055204	32,21651	0,25567	1,883141
Ubus Std >15-18t 80ties	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	31,83918	0,074864	69354,16	1,604721	9,909233
Ubus Std >15-18t Euro-1	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	22,36017	0,079224	4200,631	1,203852	5,969029
Ubus Std >15-18t Euro-2	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	23,52993	0,076432	1237,42	0,967295	6,318989
Ubus Std >15-18t Euro-3	NOx	$y=(a+(b/(1+\exp((((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	3,546874	90,39407	1,385683	1,248627	0,007924
Ubus Std >15-18t Euro-4	NOx	$y=(a+(b/(1+\exp((((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	2,666701	72,66074	0,106876	0,869381	0,030595
Ubus Std >15-18t Euro-5	NOx	$y=(a+(b/(1+\exp((((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	1,384147	23,76657	1,85222	1,30918	0,009487
Ubus Artic >18t 80ties	NOx	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	37,23276	-0,07314	12,11048		
Ubus Artic >18t Euro-1	NOx	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x)))/d))$	35,3035	-0,02418	-2,4043	0,089934	
Ubus Artic >18t Euro-2	NOx	$y=(a+(b/(1+\exp((((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	7,208453	165,3811	-0,92517	0,455566	0,046573
Ubus Artic >18t Euro-3	NOx	$y=(a+(b/(1+\exp((((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	4,290929	93,77408	1,394286	1,201991	0,008479
Ubus Artic >18t Euro-4	NOx	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x)))/d))$	27,00406	-0,02975	-2,52905	0,116283	
Ubus Artic >18t Euro-5	NOx	$y=((a+(b*x))+((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x)))/d))$	19,98526	-0,02155	-2,09395	0,125547	

Anexo 14. Factores de emissão de NOx para veículos pesados de passageiros.

Fonte: Emission Inventory Guidebook, 2007



Subsegment	Pollutant	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0,313274	-0,02307	6,70588	0,066876	2,705885
RT <=7.5t Euro-1	NOx	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x)))/d))$	8,165966	0,027157	-0,45378	0,069107	
RT <=7.5t Euro-2	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0,440376	-0,0161	6,947728	0,082935	1,85299
RT <=7.5t Euro-3	NOx	$y=((a*(b*x))^(x^c))$	40,48116	1,019019	-0,98278		
RT <=7.5t Euro-4	NOx	$y=((a*(b*x))^(x^c))$	17,34969	1,019685	-0,89895		
RT <=7.5t Euro-5	NOx	$y=((a*(b*x))^(x^c))$	13,87728	1,021066	-0,99683		
RT >7,5-12t 80ties	NOx	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x)))/d))$	20,41768	0,046273	-0,97836	0,061538	
RT >7,5-12t Euro-1	NOx	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x)))/d))$	14,35637	0,021412	-0,85679	0,075653	
RT >7,5-12t Euro-2	NOx	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x)))/d))$	15,89456	0,015869	-0,98571	0,079659	
RT >7,5-12t Euro-3	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	11,96738	0,095909	32,00181	0,41519	3,299346
RT >7,5-12t Euro-4	NOx	$y=((a*(b*x))^(x^c))$	26,30369	1,014975	-0,84409		
RT >7,5-12t Euro-5	NOx	$y=((a*(b*x))^(x^c))$	20,34058	1,016285	-0,93064		
RT >12-14t 80ties	NOx	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x)))/d))$	24,0658	0,035649	-1,21654	0,065159	
RT >12-14t Euro-1	NOx	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x)))/d))$	16,46893	0,014873	-0,9857	0,076473	
RT >12-14t Euro-2	NOx	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)*d*x)))/d))$	18,38298	0,008121	-1,15117	0,081042	
RT >12-14t Euro-3	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	9,809941	0,07081	33,33366	0,338791	3,495625
RT >12-14t Euro-4	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	6,172235	0,082395	43,28401	0,584054	2,156359
RT >12-14t Euro-5	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	3,589591	0,07765	19,38866	0,45944	1,265997
RT >14-20t 80ties	NOx	$y=(1/(((c*(x^2))+(b*x))+a))$	0,022542	0,002914	-2,3E-05		
RT >14-20t Euro-1	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	16,20426	0,079647	33,22219	0,495706	5,112544
RT >14-20t Euro-2	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	16,01652	0,072982	29,18655	0,386266	5,459923
RT >14-20t Euro-3	NOx	$y=(a+(b/(1+\exp((((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	3,91192	320,1769	-1,17977	0,902311	0,024854
RT >14-20t Euro-4	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	7,209398	0,067391	30,95437	0,402826	2,493326
RT >14-20t Euro-5	NOx	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	4,346702	0,064961	20,28617	0,370179	1,463061

Anexo 15. Factores de emissão de NOx para veículos pesados de mercadorias.

Fonte: Emission Inventory Guidebook, 2007

Subsegment	Pollutant	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
Coach Std <=18t 80ties	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	1,485945	0,04582	2,288555	0,207516	0,257476
Coach Std <=18t Euro-1	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	1,122261	0,040222	1,350413	0,171204	0,175077
Coach Std <=18t Euro-2	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0,444899	0,04947	0,588267	0,230939	0,106394
Coach Std <=18t Euro-3	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,081274	0,984218	2,783494	1,201769	0,009398
Coach Std <=18t Euro-4	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0,143135	0,051369	0,458074	0,225837	0,019925
Coach Std <=18t Euro-5	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0,147448	0,051188	0,473172	0,225785	0,0204
Ubus Std >15-18t 80ties	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	2,165868	0,055976	4,965268	0,254467	0,313815
Ubus Std >15-18t Euro-1	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0,99159	0,052273	1,611258	0,292405	0,180216
Ubus Std >15-18t Euro-2	PM	$y=(c+(a*\exp((-1)*b*x)))$	0,506497	0,071686	0,105392		
Ubus Std >15-18t Euro-3	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,090692	1,155339	-0,00982	0,330919	0,04771
Ubus Std >15-18t Euro-4	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0,132608	0,061406	0,422293	0,311096	0,016306
Ubus Std >15-18t Euro-5	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0,134956	0,061428	0,429938	0,311471	0,016557
Ubus Artic >18t 80ties	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	2,329389	0,05298	4,756275	0,223496	0,362121
Ubus Artic >18t Euro-1	PM	$y=(1/(((c*(x^2))+(b*x))+a))$	0,377978	0,064951	-0,00014		
Ubus Artic >18t Euro-2	PM	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	0,561064	-0,06331	0,125228		
Ubus Artic >18t Euro-3	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((((1)*c)+(d*\ln(x)))+(e*x))))$	0,100923	1,277414	-0,04339	0,305217	0,047531
Ubus Artic >18t Euro-4	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0,147825	0,060371	0,449618	0,304334	0,018037
Ubus Artic >18t Euro-5	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)*b*x)))+(c*\exp((-1)*d*x)))$	0,15046	0,06051	0,458613	0,30552	0,018295

Anexo 16. Factores de emissão de partículas para veículos pesados de passageiros.

Fonte: Emission Inventory Guidebook, 2007



Subsegment	Pollutant	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0,917027	0,053618	1,243596	0,244432	0,229571
RT <=7.5t Euro-1	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((-1)^c+(d*\ln(x))))+(e*x))))$	0,08914	3,644625	-1,45332	0,267996	0,052418
RT <=7.5t Euro-2	PM	$y=(1/((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	5,84008	0,471608	-0,00398		
RT <=7.5t Euro-3	PM	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)^d*x))/d)))$	0,211016	-0,00015	-0,00937	0,057458	
RT <=7.5t Euro-4	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0,025474	0,037701	0,072251	0,167316	0,005728
RT <=7.5t Euro-5	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0,025714	0,037528	0,073061	0,166981	0,005741
RT >7,5-12t 80ties	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0,981636	0,051779	1,540928	0,187326	0,21104
RT >7,5-12t Euro-1	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0,756542	0,061374	0,525614	0,162125	0,128855
RT >7,5-12t Euro-2	PM	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)^d*x))/d)))$	0,284705	0,000652	-0,01349	0,054137	
RT >7,5-12t Euro-3	PM	$y=((a+(b*x))+(((c-b)*(1-\exp((-1)^d*x))/d)))$	0,500347	-0,00021	-0,03115	0,073153	
RT >7,5-12t Euro-4	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0,048445	0,0475	0,128573	0,165752	0,009947
RT >7,5-12t Euro-5	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0,050787	0,04831	0,130793	0,167934	0,010142
RT >12-14t 80ties	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	1,015403	0,052878	1,776679	0,189482	0,234694
RT >12-14t Euro-1	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((-1)^c+(d*\ln(x))))+(e*x))))$	0,009484	1,171615	4,59514	1,933014	-0,02345
RT >12-14t Euro-2	PM	$y=(1/((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	2,173069	0,344394	-0,00277		
RT >12-14t Euro-3	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((-1)^c+(d*\ln(x))))+(e*x))))$	0,040475	0,417016	5,934163	2,377803	-0,02296
RT >12-14t Euro-4	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((-1)^c+(d*\ln(x))))+(e*x))))$	0,007162	0,143077	3,626188	1,743279	-0,00861
RT >12-14t Euro-5	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((-1)^c+(d*\ln(x))))+(e*x))))$	0,007163	0,14551	3,643163	1,748278	-0,00881
RT >14-20t 80ties	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	1,346563	0,05015	2,549076	0,170351	0,310437
RT >14-20t Euro-1	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((-1)^c+(d*\ln(x))))+(e*x))))$	0,085291	1,630353	4,919612	2,061817	-0,01801
RT >14-20t Euro-2	PM	$y=(1/((c*(x^2)))+(b*x))+a)$	1,298412	0,281673	-0,00213		
RT >14-20t Euro-3	PM	$y=(a+(b/(1+\exp((-1)^c+(d*\ln(x))))+(e*x))))$	0,060068	0,651468	5,54523	2,246586	-0,01644
RT >14-20t Euro-4	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0,070454	0,045808	0,215027	0,170798	0,014455
RT >14-20t Euro-5	PM	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0,071591	0,045669	0,219635	0,170893	0,014585

Anexo 17. Factores de emissão de partículas para veículos pesados de mercadorias.

Fonte: *Emission Inventory Guidebook, 2007*

Subsegment	Pollutant	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
Coach Std <=18t 80ties	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	746,9908	0,056259	2046,349	0,352335	180,4981
Coach Std <=18t Euro-1	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	648,8024	0,054408	2655,65	0,401064	165,2382
Coach Std <=18t Euro-2	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	594,0131	0,05163	2921,989	0,423127	166,0862
Coach Std <=18t Euro-3	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	708,0736	0,055349	3362,341	0,431499	185,3243
Coach Std <=18t Euro-4	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	686,8398	0,055687	3621,08	0,438098	175,2645
Coach Std <=18t Euro-5	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	714,5066	0,055414	3670,184	0,431329	179,6608
Ubus Std >15-18t 80ties	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	790,3517	0,069843	35043,6	0,870545	200,371
Ubus Std >15-18t Euro-1	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	650,6739	0,07304	240583,5	1,278808	172,0502
Ubus Std >15-18t Euro-2	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	592,8845	0,072884	2373425	1,699545	169,6729
Ubus Std >15-18t Euro-3	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	632,6732	0,072965	2412225	1,693504	177,6863
Ubus Std >15-18t Euro-4	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	619,8745	0,07386	577120,2	1,449455	167,4396
Ubus Std >15-18t Euro-5	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	638,5628	0,073721	470765,1	1,408442	170,5332
Ubus Artic >18t 80ties	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	891,4559	0,068074	145960,7	1,114684	238,6592
Ubus Artic >18t Euro-1	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	708,3956	0,06812	2169620	1,645694	207,1906
Ubus Artic >18t Euro-2	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	632,5804	0,066173	26151233	2,093122	204,1631
Ubus Artic >18t Euro-3	FC	$y=(c+(a*\exp(b*x)))$	741,0665	-0,07214	216,4697		
Ubus Artic >18t Euro-4	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	664,7677	0,068031	4886665	1,799212	200,0394
Ubus Artic >18t Euro-5	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	684,8407	0,068104	3844376	1,752679	203,6089

Anexo 18. Factores de consumo de combustível para veículos pesados de passageiros.

Fonte: *Emission Inventory Guidebook, 2007*



Subsegment	Pollutant	Formula (y: g/km; x: km/h)	a	b	c	d	e
RT <=7.5t 80ties	FC	$y=((a*(x^b))+(c*(x^d)))$	0,000241	2,736526	676,0667	-0,4997	
RT <=7.5t Euro-1	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0,398468	-0,05086	195,7502	0,081511	78,07941
RT <=7.5t Euro-2	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0,707093	-0,0448	169,3977	0,079606	72,61773
RT <=7.5t Euro-3	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	1,014595	-0,04122	187,4573	0,077275	75,34241
RT <=7.5t Euro-4	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0,654282	-0,04441	190,7563	0,081763	73,05983
RT <=7.5t Euro-5	FC	$y=((e+(a*\exp((-1)^b*x)))+(c*\exp((-1)^d*x)))$	0,59829	-0,0453	196,3407	0,081871	74,40524
RT >7,5-12t 80ties	FC	$y=(1/((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,001138	0,000187	-1,5E-06		
RT >7,5-12t Euro-1	FC	$y=((a*(x^b))+(c*(x^d)))$	9,51E-05	2,994606	963,4645	-0,5511	
RT >7,5-12t Euro-2	FC	$y=(1/((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,001815	0,000236	-2E-06		
RT >7,5-12t Euro-3	FC	$y=(1/((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,001565	0,000225	-1,9E-06		
RT >7,5-12t Euro-4	FC	$y=(1/((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,001574	0,000242	-2E-06		
RT >7,5-12t Euro-5	FC	$y=(1/((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,001505	0,000237	-2E-06		
RT >12-14t 80ties	FC	$y=(1/((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,000896	0,00018	-1,4E-06		
RT >12-14t Euro-1	FC	$y=(1/((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,001242	0,000217	-1,8E-06		
RT >12-14t Euro-2	FC	$y=(1/((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,001489	0,000222	-1,8E-06		
RT >12-14t Euro-3	FC	$y=(1/((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,001269	0,000213	-1,7E-06		
RT >12-14t Euro-4	FC	$y=(1/((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,001304	0,000228	-1,8E-06		
RT >12-14t Euro-5	FC	$y=(1/((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,001248	0,000224	-1,8E-06		
RT >14-20t 80ties	FC	$y=(1/((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,000576	0,000137	-9,6E-07		
RT >14-20t Euro-1	FC	$y=((a*(x^b))+(c*(x^d)))$	0,000121	2,935313	1720,376	-0,63016	
RT >14-20t Euro-2	FC	$y=(1/((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,000966	0,000182	-1,4E-06		
RT >14-20t Euro-3	FC	$y=(1/((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,000802	0,000174	-1,3E-06		
RT >14-20t Euro-4	FC	$y=(1/((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,000816	0,000186	-1,4E-06		
RT >14-20t Euro-5	FC	$y=(1/((c*(x^2))+(b*x))+a)$	0,000784	0,000182	-1,3E-06		

Anexo 19. Factores de consumo de combustível para veículos pesados de mercadorias.

Fonte: *Emission Inventory Guidebook, 2007*